

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. БЕКЕТОВА

А. С. ЛИТВИНЕНКО,
О. Л. ЧЕРКАШИНА

СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2015

УДК 628.94(075)
ББК 31.294-5я73-6
Л64

Автори

Литвиненко Анатолій Савелійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри світлотехніки і джерела світла;

Черкашина Олена Леонідівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри світлотехніки і джерела світла

Рецензенти

Яковенко В. М. – доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України, директор Інституту радіофізики і електроніки НАН України;

Чорногор Л. Ф. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України, як навчальний посібник
для студентів вищих технічних навчальних закладів
лист № 1/11 - 8943 від 28.05.2013 р.*

Литвиненко А. С.

Л64 Світлові прилади: навч. посібник для студентів вищих технічних навчальних закладів / А. С. Литвиненко, О. Л. Черкашина ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 125 с.

ISBN 978-966-695-360-8

Розглянуто основні відомості про сучасні світлові прилади. Наведено класифікацію світлових приладів і їхні світлотехнічні характеристики. Викладено властивості оптичних систем світлових приладів. Висвітлено методи світлотехнічних розрахунків оптичних систем як широко розповсюджених, так і принципово нових світлових приладів, заснованих на використанні світлодіодних джерел світла.

Посібник призначений для студентів, які спеціалізуються на електротехніці, світлотехніці, для інженерів і конструкторів світлотехнічної апаратури.

УДК 628.94(075)
ББК 31.294-5я73-6

ISBN 978-966-695-360-8

© А. С. Литвиненко, О. Л. Черкашина, 2015
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015

Список скорочень

ДСТУ - державний стандарт України
ЄСКД - єдина система конструкторської документації
УДК - універсальна десяткова класифікація
ТЗ - технічне завдання
НДР - науково-дослідна робота
РД - робоча документація
ДКР - дослідно-конструкторська робота
ТЭО - техніко-економічне обґрунтування
ТУ - технічні умови
НТД - науково-технічна документація
ТКВ - технологічність конструкції виробу
МКВ - міжнародна класифікація винаходів
НКВ - національна класифікація винаходів
БД - бази даних
ДПА - довідково-пошуковий апарат
ВПТБ - Всесоюзна патентно-технічна бібліотека
ВНТИ - відділ науково-технічної інформації
СП - світловий прилад
ОУ - освітлювальна установка
ОП- освітлювальний прилад
КСС - крива сили світла
ДС - джерело світла
ККД - коефіцієнт корисної дії
ІЧ - інфрачервоний
УФ- ультрафіолетовий
ПРА - пуско-регулювальна апаратура
ЛР - лампа розжарювання
ГЛР - галогенна лампа розжарювання
ЛЛ - люмінесцентна лампа
ДРЛ - дугова ртутна люмінесцентна лампа
МГЛ - металогалогенна лампа
ЕП - електроустановочний пристрій
ДРИ - дугова ртутна іодідна лампа
ДНАТ - дугова натрієва трубчаста лампа
НЛВТ - натрієва лампа високого тиску
ДРІШ - короткодугова метало-галогенна лампа
ТПС - твердотіла повноохоплююча оптична система
СД - світлодіод
УП - увідний пристрій
ГВС - гнучкі волоконні світловоди
ПММА - поліметилметакрил
ЕВ - елементарні відображення
ФСТ - фігура світлих точок
ТПС - твердотіла повноохоплююча оптична система

ВСТУП

Сучасне суспільство важко уявити без широкого використання штучного світла. Світлові прилади створюють необхідні умови оптимального зорового сприйняття (бачення) навколишньої дійсності, що дозволяє отримати близько 90 % інформації, від оточуючого людину світу. Світло створює придатні умови для роботи й навчання, поліпшує наш побут. Без сучасних освітлювальних приладів неможлива робота шахт і копалень, підприємств, у безліхтарних і безвіконних будинках, метрополітену, багатьох вибухо- та пожежонебезпечних виробництв. Без штучного світла не може обійтися жодне сучасне місто, без нього неможливі будівництво й сільськогосподарські роботи в темний час доби, а також функціонування деяких видів транспорту. Світло дає змогу літати в космос, досліджувати Світовий океан. Оптичне випромінювання все ширше застосовується в сучасних технологічних процесах у промисловості й сільському господарстві, стає невід'ємною частиною фотохімічних виробництв, відіграє важливу роль у підвищенні продуктивності тваринництва і птахівництва, урожайності рослинних культур. Світлова сигналізація є одним із найрозповсюдженіших засобів зв'язку, особливо на деяких видах транспорту. Освітлення - це четвертий вимір архітектури, який становить найважливіший інструмент для створення бажаної атмосфери й не тільки. Без освітлювальних приладів як елементів декоративного оформлення не обходиться жодна рекламна акція. За допомогою освітлювальних елементів на стенді чи щиті вітрини формуються три основні оптичні зони: показу, пересування й комунікації.

В Україні наразі лише у промисловості й сільському господарстві, у громадських і житлових будівлях, на вулицях міст встановлено більше 250 млн світлових точок сумарною потужністю близько 25 млн кВт. На освітлення щорічно витрачається понад 45 млрд кВт-г, що виробляється у країні, тобто приблизно 13 % електроенергії. Цілком очевидно, що питання енергозбереження в ОУ є на сьогодні актуальними. Розкрити потенціал заощадження енергії можна шляхом упровадження інноваційних концепцій освітлення й використання сучасних енергоефективних світильників. Усе вищесказане вимагає підготовки фахівців нового рівня кваліфікації, нової спеціалізації.

У навчальному посібнику, призначеному для студентів світлотехнічних спеціальностей, наведено класифікацію світлових приладів і їхні світлотехнічні характеристики. Розглянуто оптичні системи й висвітлено методи світлотехнічних розрахунків оптичних систем як розповсюджених, так і принципово нових світлових приладів, заснованих на використанні світлодіодних джерел світла. Матеріал, викладений у 3, 4 главах, дозволить читачеві оволодіти принципами побудови й розрахунку світлових приладів, які тільки виходять на світлотехнічний ринок, формуючи таким чином, фахівця нового класу, спроможного вирішувати інженерні завдання на новому технічному рівні.

1. СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ

Світловим приладом (СП) називається пристрій, що складається з джерела чи джерел світла (лампи, світлодіоди) і світлотехнічної арматури. Світлотехнічна арматура перерозподіляє світло лампи у просторі чи перетворює його властивості (змінює спектральний склад випромінювання чи поляризує його). Разом з цим світлотехнічна арматура СП захищає лампи від впливу навколишнього середовища, механічних ушкоджень, забезпечує кріплення лампи й підключення до джерела живлення.

СП – це зазвичай складний виріб, який включає такі взаємозалежні елементи: лампи, ПРА, конденсатори, електровстановлювальні пристрої, дроти, а також конструктивні вузли й оптичні системи, параметри якої залежать від особливостей конструкції СП і помітно впливають на його характеристики в цілому.

1.1. Класифікація світлових приладів

Класифікація використовуваних СП здійснюється за основними та додатковими ознаками.

1.1.1. Класифікація СП за основними ознаками

До основних ознак СП належать наступні:

- основна світлотехнічна функція;
- характер світлорозподілу;
- умови експлуатації.

Пріоритетною світлотехнічною функцією СП є:

- освітлювальні прилади;
- прилади для світлової сигналізації (світлові маяки, світлофори);
- рекламне освітлення.

За характером світлорозподілу виділяють наступні типи СП:

- Світильники - це СП, які перерозподіляють світло лампи (ламп) усередині великих тілесних кутів (до 4π) і забезпечують кутову концентрацію світлого потоку з коефіцієнтами підсилення не більш 30 для вісесиметричних і не більше 15 для симетричних приладів. Виділяють такі види світильників:

- загального освітлення - світильники призначені для загального освітлення приміщень і відкритих просторів;
- місцевого освітлення - світильники розраховані переважно на освітлення робочих поверхонь;
- комбінованого освітлення - світильники, які створюють (по черзі чи одночасно) як загальне, так і місцеве освітлення.

- Прожектори - СП, що перерозподіляють світло лампи усередині малих тілесних кутів і забезпечують кутову концентрацію світлого потоку з коефіцієнтами підсилення більше 30 для вісесиметричних і більше 15 для симетричних приладів. Виділяють шість типів прожекторів:

- загального призначення – прожектори, що виконують функції тривалого освітлення робочих поверхонь і використовуються для освітлення відкритих просторів, архітектурних пам'яток, фасадів будівель тощо. Такі прожектори також називають прожекторами заливаючого світла;
 - пошукові - прожектори дальньої дії, призначені для короткочасного освітлення дуже віддалених об'єктів з метою їхнього виявлення; можуть вбути зенітними, морськими тощо;
 - світлосигнальні - прожектори призначені для передавання сигналів за азбукою Морзе чи іншою системою;
 - маяки (аеродромні, морські, річкові, навігаційні тощо) - сигналізують про розташування маяка;
 - світлофори –прожектори, що використовуються для передачі світлових сигналів, які регулюють рух транспорту та людей;
 - фари - світлові прилади прожекторного типу, що встановлюються на транспортних засобах для освітлення дороги.
- Проектори - СП, що перерозподіляють світло лампи з концентрацією світлового потоку на поверхні малого розміру чи в малому обсязі. Виділяють такі п'ять видів проекторів:

- екранні – проектори, які переважно є освітлювальною частиною світлопроеційних приладів, що концентрують світловий потік на кадровому вікні, у якому розташований рисунок чи діапозитив, відображуваний об'єктивом на екрані;
- епіскопи – проектори призначені для проектування на екран поверхонь, що посиляють в об'єктив відбитий світловий потік (від рисунків, креслень);
- діаскопи – проеціююча діапозитив, кінокадр поверхня, яка посиляє в об'єктив світловий потік, що пройшов крізь нього;
- епідіаскопи – проектори, які можуть працювати і як епіскопи, і як діаскопи;
- технологічні (концентратори) – проектори призначені для променевого нагрівання об'єктів, наприклад, для випаровування рідин, плавлення металу, накачування лазерів.

Таким чином, основною характеристикою, яка визначає поділ СП на світильники, прожектори і проектори, є ступінь і характер концентрації світлового потоку лампи в пучку приладу.

За умовами експлуатації СП поділяються на такі види:

- світлові прилади для приміщень;
- світлові прилади для відкритих просторів (вуличні, садово-паркові тощо);
- світлові прилади для екстремальних середовищ (під екстремальними середовищами розуміються такі умови, коли одна чи кілька характеристик середовища мають значення, що різко перевищують

значення для інших умов (наприклад, температура значно вища +40 чи нижча -60, має місце абсолютний вакуум чи СП занурений у воду)).

1.1.2. Класифікація СП за додатковими ознаками

За додатковими ознаками СП класифікують наступним чином:

1. За типом лампи:

- з лампою розжарювання;
- з розрядною лампою;
- з лампами змішаного світла;
- з радіоізотопними й електролюмінісcentними джерелами світла;
- з електричною дуговою вугільною лампою;
- світлодіодні.

2. За формою фотометричного тіла СП бувають наступними:

- симетричні світлові прилади, фотометричне тіло яких має вісь чи площину симетрії;
- круглосиметричні світлові прилади, фотометричне тіло яких має вісь симетрії;
- несиметричні світлові прилади.

Існує міжнародна система класифікації й позначення СП та іншого електротехнічного устаткування за ступенем захищеності від впливу вологи (води) і твердих часток (пилу). Ступінь захисту позначається буквами IP (Ingress Protection - захист від проникнення) і двома цифрами. Перша цифра вказує на ступінь захищеності СП від проникнення пилу та сторонніх тіл і може набувати значення від 0 до 6. Друга цифра - ступінь проникнення води усередину СП. Ця цифра може коливатися від 0 до 8. Інші позначення цифр коду IP наведені в додатку А.

3. За ступенем захищеності від води й пилу СП класифікують таким чином:

- водонезахищені (захист від води відсутній);
- краплезахищені (є захист від крапель, що падають під кутом вертикалі до 15°);
- дощезахищені (наявний захист від дощу, що падає під кутом вертикалі до 60°);
- бризкозахищені (є захист від бризків, що потрапляють під будь-яким кутом);
- струмонебезахищені (наявний захист від струменів води, що потрапляють під будь-яким кутом);
- водонепроникні (є захист від потрапляння води при зануренні на визначені глибину й час);
- герметичні (наявний захист від потрапляння води при необмежено довгому зануренні світлового приладу на визначену глибину);
- пилонезахищені:
 - відкриті (спеціальний захист від пилу відсутній, немає захисту від можливості дотику персоналу до струмовивідних частин);

- перекриті (потрапляння пилу обмежене неущільненими світлопропускальними оболонками; наявний захист від можливості дотику до струмовивідних частин);
 - пилозахищені:
 - повністю пилозахищені (є захист від потрапляння пилу на струмовивідні частини й колби ламп);
 - з обмеженою пилозахищеною зоною (наявний захист від потрапляння пилу на струмовивідні частини);
 - пилонепроникні:
 - повністю пилонепроникні (мають повний захист від потрапляння пилу на струмовивідні частини й колби ламп і можливості дотику до струмовивідних частин);
 - із обмеженою пилонепроникною зоною (наявний неповний захист від потрапляння пилу на струмовивідні частини, а також повний захист від можливості дотику до струмовивідних частин).
4. За ступенем захисту від ураження електричним струмом. Належність СП до класу захисту від ураження електричним струмом наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Належність СП до класів захисту від ураження електричним струмом

Класи захисту світлових приладів від ураження електричним струмом	Фактори, що визначають належність до класу
0	СП мають робочу ізоляцію без уземленого дроту
0I	СП мають робочу ізоляцію, елемент для уземлення і дріт без уземлювальної жили для приєднання до джерела живлення
I	СП мають робочу ізоляцію й елемент для уземлення. Дріт для приєднання до джерела живлення мусить мати уземлювальну жилу ріжки із уземлювальним контактом
II	СП має подвійну чи підсилену ізоляцію і не має елементів для уземлення
III	СП призначені для роботи за безпечної наднизької напруги (42 В чи в особливо небезпечних зонах - 12 В) не мають ані зовнішніх, ані внутрішніх електричних ланцюгів, що працюють за іншої напруги

Примітка:

- робоча ізоляція забезпечує нормальну роботу СП і основний захист від ураження електричним струмом;
- додаткова (захисна) ізоляція - незалежна ізоляція, передбачена додатково до робочої ізоляції для захисту від ураження електричним струмом при порушенні робочої ізоляції;
- подвійна ізоляція - ізоляція, що включає як робочу, так і додаткову ізоляцію;

– посилена ізоляція - поліпшена робоча ізоляція з такими електричними й механічними властивостями, за яких вона забезпечує той же ступінь захисту від ураження електричним струмом, що й подвійна.

5. За ступенем захищеності від пожежі.

Пожежобезпечність СП безпосередньо пов'язана з їхніми тепловими параметрами й характеризується відповідністю температури на всіх елементах СП припустимим значенням як при нормальній роботі, так і в аварійних режимах.

- За температурою нагрівання джерел світла й апаратів увімкнення ламп.

Під час роботи всі джерела світла нагріваються до визначеної температури, що залежить, насамперед, від типу, потужності й умов охолодження. Температура розжарювання може бути доволі високою: зовнішня поверхня галогенних ламп розжарювання - 40°C, поверхня ламп розжарювання загального призначення - 200° С, МГЛ і НЛВТ - 300° С.

Відповідно до Правил будови електроустановок усі СП поділяються на шість температурних груп (від Т1 до Т6). Температура на поверхні будь-яких елементів СП для цих груп не має перевищувати наступних значень: для Т1 - 450, Т2 - 300, Т3 - 200, Т4 - 135, Т5 - 100 Т6 -80 °С.

В той же час небезпека виникнення пожежі залежить також від умов експлуатації СП - типу матеріалу, на якому встановлюється ОП, наявності в освітлюваному приміщенні легкозаймистих речовин, запиленості приміщень.

- За типом матеріалу, на якому встановлюється СП.

На вбудовані стельові, настінні, настільні і підлогові СП наносяться спеціальні знаки, що характеризують їхню пожежонебезпеку.

- За наявністю в освітлюваному приміщенні легкозаймистих речовин, за запиленістю приміщень.

Із метою виключення ймовірності виникнення пожежобезпечних ситуацій необхідно знати ступінь пожежонебезпеки як самих СП, так і приміщень, у яких вони працюють. Світильники, призначені для роботи в пожежобезпечних приміщеннях, конструктивно мають відповідати класифікації таких приміщень (табл.1.2.).

Таблиця 1.2 - Класифікація приміщень за класом пожежонебезпечності

Тип приміщення	Характеристика приміщення	Конструктивне виконання СП
П – I	Містять горючу речовину з температурою займання вище 45°C	Повністю пилозахищені, пилонепроникні
П – II	Наявний горючий пил чи волокна у зваженому стані	Повністю пилозахищені, пилонепроникні
П – ПА	Містять тверді чи волокнисті горючі речовини	Пилозахищені із захисним ковпаком
П – III	Зовнішні установки, у яких зберігаються чи використовуються горючі речовини із температурою займання вище 45° С	Частково чи пилозахищені

6. За ступенем захисту від вибуху.

- Підвищена противибухова надійність - СП, у яких передбачені способи захисту від виникнення іскор, електричних дуг і небезпечного нагрівання елементів, що забезпечують вибухозахист за нормального режиму роботи;
- вибухозахищені - СП, у яких передбачені способи захисту навколишнього вибухонебезпечного середовища від виникнення іскор, електричних дуг і небезпечного нагрівання елементів, що забезпечують вибухозахист за нормального й аварійного режимів роботи;
- особливо вибухозахищені - СП, що мають додаткові способи захисту від вибуху.

Вибухозахищені СП для внутрішніх і зовнішніх установок мають такі способи вибухозахисту:

- 1) вибухонепроникнена оболонка - це вид вибухозахисту СП, за якого останні мають оболонку, яка витримує тиск від вибуху всередині й запобігає розповсюдженню вибуху з оболонки в навколишнє вибухонебезпечне середовище.
- 2) Іскробезпечний електричний ланцюг - вид вибухозахисту, за якого електричний ланцюг СП проектується таким чином, що електричний розряд чи нагрів СП не може викликати займання у вибухонебезпечному середовищі.
- 3) Захист типу "е" - вид вибухозахисту, який реалізується завдяки тому, що елементи СП не мають частин, які нормально іскрять, а також уживанню низки заходів, що запобігають нагріванню, виникненню іскор, електричних дуг.
- 4) Заповнення чи продування оболонки надлишковим тиском - вид вибухозахисту, за якого СП заповнюється прозорою рідиною та має пристрій для відключення живлення при зниженні тиску.
- 5) Автоматичне захисне утворення - вид вибухозахисту, який забезпечує автоматичне відключення СП від джерела струму при руйнуванні колби лампи чи світлопрозорого елемента.

Залежно від галузі використання вибухозахищені світильники поділяються на такі види:

- рудникові - для шахт і копалень;
- для виробництв газової, нафтової, хімічної та інших галузей промисловості.

7. За можливістю пересування при експлуатації СП поділяються на такі види:

- стаціонарні (закріплюються на місці встановлення; щоб зняти такі СП необхідне застосування інструменту);
- нестаціонарні (можуть зніматися із місця експлуатації без застосування інструменту й переміщаються із одного місця на інше);
- переносні (нестаціонарні прилади з індивідуальним джерелом живлення, що можуть вимикатися під час переміщення СП);

- пересувні (нестационарні світлові прилади з автономним джерелом живлення, які можуть з'єднуватися з живильною мережею гнучким дротом, що не вимикається під час пересування його за допомогою спеціального візка).
8. За способом живлення лампи виділяють наступні види СП:
- мережеві (світлові прилади, що живляться від електричної мережі);
 - автономні (світлові прилади з індивідуальним джерелом живлення);
 - комбінованого живлення (світлові прилади, що мають індивідуальне джерело живлення й пристрій для приєднання до електричної мережі).
9. За можливістю зміни положення оптичної системи виділяють такі види СП:
- рухомі (світлові прилади, конструкція яких дозволяє під час експлуатації змінювати положення оптичної системи у просторі);
 - нерухомі.
10. За можливістю зміни світлотехнічних характеристик СП бувають наступних видів:
- регульовані (світлові прилади, світлотехнічні характеристики яких можуть регулюватися у визначених межах);
 - нерегульовані.
11. За способом охолодження виділяють СП:
- із природним охолодженням;
 - з примусовим охолодженням.
12. За основним призначенням СП поділяться на низку наступних груп:
- СП для виробничих приміщень;
 - СП для адміністративних, офісних, культосвітніх та інших приміщень громадського призначення;
 - СП для побутових приміщень;
 - СП для сільськогосподарських приміщень;
 - СП для спортивних споруд;
 - СП для функцій зовнішнього освітлення;
 - СП для декоративного зовнішнього освітлення;
 - СП для внутрішнього освітлення засобів транспорту;
 - СП для архітектурно-художнього освітлення будівель, пам'ятників, фонтанів тощо;
 - СП аварійного освітлення.
- Кожна з цих груп, у свою чергу, поділяється на підгрупи. Так, у групі СП для освітлення виробничих приміщень можна виділити:
- СП для приміщень із нормальним середовищем;
 - СП для приміщень із «важким» середовищем (накурених, вологих, із агресивними випаровуваннями);
 - СП для вибухонебезпечних приміщень;
 - СП для пожежонебезпечних приміщень.
13. За типом систем освітлення, у яких застосовують світильники, СП поділяються на шість різновидів (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 - Класифікація СП за типом систем освітлення

Класифікація світильників за призначенням	Призначення
Світильники загального освітлення (підвісні, стельові, настінні, підлогові, настільні)	Для загального освітлення приміщень
Світильники місцевого освітлення (настільні, підлогові, настінні, підвісні, СП, що прибудовуються або вбудовуються в меблі)	Для забезпечення освітлення робочої поверхні відповідно до виконуваної зорової роботи
Світильники комбінованого освітлення (підвісні, настінні, підлогові, настільні)	Виконують функції як світильника загального, так і місцевого чи освітлення одночасно обидві функції
Декоративні світильники (настільні, настінні)	Виконують функцію елемента оздоблення інтер'єра
Світильники для орієнтації - каганці (настільні, настінні)	Для створення освітлення, необхідного для орієнтації в житлових приміщеннях у темний час доби
Експозиційні світильники (настільні, настінні, СП що прибудовуються або вбудовуються, стельові, підвісні, підлогові)	Для освітлення окремих об'єктів

14. У середині приміщень за місцем установлення світильники класифікуються на 10 груп (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Класифікація світильників за місцем установлення.

Способи встановлення світильників	Символ (буква) у позначенні типу світильника
Підвісні	С
Стельові	П
Вбудовані	В
Прибудовані	Д
Настінні	Б
Настільні, опірні	Н
Вінчальні підлогові	Т
Консольні, торцеві	К
Ручні	Р
Головні	Г

15. За конструктивним виконанням світильники поділяють на групи і класи, наведені в табл. 1.5.

Примітка:

- група А (світильники із високотемпературними джерелами світла):

- АІ без примусового охолодження;
- АІІ з примусовою вентиляцією чи охолодженням газоподібним чи рідким теплоносієм;

- група Б (світильники з люмінесцентними лампами):

- БІ світильники з відкритими розсіювачами чи без них;
- БІІ світильники з закритими розсіювачами;

- БП з примусовою вентиляцією чи охолодженням газоподібним чи рідким теплоносієм.

Таблиця 1.5 – Групи і класи СП за конструктивним виконанням

Клас Група		I	II	III	IV	V	VI	VII
A	A1							
	A2							
B	B1							
	B2							
	B3							

На класи світильники поділяються з I по VII відповідно до зростання герметизації і ступеня захисту від впливу зовнішнього середовища; взаєморозташування ДС, відбивачів і розсіювачів чи захисних світлопропускаючих елементів таким чином:

- відкриті (лампа не відділена від зовнішнього середовища);
- захищені (лампа відділена від зовнішнього середовища оболонкою, що передбачає вільний прохід повітря);
- закриті (оболонка захищає від проникнення великих часток);
- пилонепроникні (оболонка не допускає проникнення всередину світильника малих часток);
- вологозахисні (корпус і патрон протистоять впливу вологи й забезпечують збереження ізоляції вставних дротів);
- вибухозахисні, які, у свою чергу, поділяються на:
 - вибухонепроникнені (оболонка світильника витримує повний тиск вибуху, продукти вибуху мають виходити зі світильника крізь щілини вже охолодженими)
 - підвищеної противибухової надійності (має виключати виникнення іскор, електричної дуги чи небезпечних температур на поверхні світильника).

За будовою для роботи у визначених умовах експлуатації СП поділяються з урахуванням наступних ознак:

- за кліматичною будовою й категорією розміщення;

- за домінуючим впливаючим фактором: температура та відносна вологість повітря;
- за механічними впливами;
- за особливими факторами середовища (стосовно кожного конкретного випадку);
- за наявністю помітних концентрацій хімічно активних речовин (стосовно кожного конкретного випадку);
- вибухонебезпечності середовища.

Ці ознаки класифікації СП є самостійними й незалежними. Таким чином, можуть існувати як світильники, так і прожектори і для освітлення, і для світлової сигналізації, при цьому зазначені прилади можуть призначатися як для застосування всередині будівель, так і для відкритих просторах чи транспортних засобах.

Світловими комплексами називаються пристрої, що складаються з набору світлових приладів, окремих світлоперерозподільних чи світлоперетворювальних елементів, конструктивних, електротехнічних та інших деталей, складальних одиниць або блоків, які збираються безпосередньо у споживача, виконують свої функції лише в зібраному вигляді і призначаються для освітлення чи сигналізації.

Подібно до класифікації СП світлові комплекси поділяються наступним чином:

1. За загальними умовами експлуатації:

- внутрішні - рекламно-інформаційні, для транспортних засобів (стелі, що світять, мнемосхеми, з порожніми чи волоконними світловодами, гірлянди);
- зовнішні - рекламно-інформаційні, для транспортних засобів (аеродромні, гірлянди тощо).

2. За основним призначенням:

- рекламно-інформаційні – світлові комплекси призначені для виведення на екран чи підсвічування текстової інформації, комп'ютерної графіки, анімації, відеозображення);
- аеродромний - світлові комплекси для злітно-посадкових смуг аеродромів);
- смуги, що світять - світлові комплекси, у яких відношення довжини поверхні, що світить, до ширини більше 5);
- стелі, що світять - світлові комплекси, розміри поверхні, що світять, яких можна порівняти з розмірами у плані освітлюваного приміщення);
- щілинні світловоди – порожньої, протяжної, циліндричної чи іншої форми світлоперерозподільчий елемент світлового комплексу, велика частина внутрішньої поверхні якого по всій довжині укрита дзеркально відбиваючим шаром, при цьому світловий потік лампи (ламп) уводиться в торець світловода, а виходить із нього по всій довжині крізь частину поверхні не-вкрито відбиваючим шаром - світлопропускаючу оптичну щілину).

Питання для самоперевірки

1. Який прилад називається світловим?
2. Функції, які виконує світлотехнічна арматура у складі світлового приладу.
3. Елементи із яких складається світловий прилад, від чого залежать їхні характеристики.
4. За якими ознаками класифікують світлові прилади?
5. Параметри світлових приладів, які належать до основних і додаткових характеристик.
6. Групи світлових приладів за характером світлорозподілу.
7. Що є основною характеристикою, яка визначає поділ СП на світильники, прожектори та проєктори?
8. Які умови навколишнього середовища називаються екстремальними?
9. Як розшифровується та що характеризує параметр IP?
10. За якими характеристиками класифікуються світлові прилади у відповідності до ступеня захисту від пожежі?
11. Яка максимальна температура нагрівання частин світильника відповідає температурній групі T5?
12. Яку конструкцію мусить мати виконаний світловий прилад, щоб використовуватися в пожежебезпечному приміщенні ступеня П-ПА?
16. Як називають світловий прилад, який має додаткові засоби захисту від вибуху?
17. Які характеристики має світловий противибуховий прилад зі ступенем захисту типу «е»?
18. У чому полягає відмінність у класифікації світильників за основним призначенням і за типом систем освітлення, у яких вони використовуються?
19. Яка основна відмінність у світильників групи А та Б і як змінюється конструкція світлових приладів зі збільшенням номера класу (класифікація за конструкцією)?
20. Які світлові прилади називаються світловими комплексами, і за яким принципом їх класифікують?

2. СВІЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СП

Найважливішими параметрами, що визначають технічний рівень СП, є світлотехнічні характеристики, до яких належать:

- криві світлорозподіли (сила світла та її розподіл у просторі);
- освітленість та її розподіл по поверхні освітлюваного об'єкта;
- яскравість поверхні, що світить, і її розподіл по поверхні світлоперерозподільного пристрою й у різних напрямках простору;
- коефіцієнт корисної дії (ККД);
- захисні кути;
- світловий потік;
- структура випромінювання (спектральні склади випромінювання і ступінь поляризації останнього).

Світлорозподіл - світлотехнічна характеристика СП, що визначає розподіл його світлового потоку в оточуючому СП просторі. Прожектори і світильники, які використовуються на відносно великих відстанях від освітлюваних об'єктів, що набагато перевищують розміри самих приладів, характеризується розподілом сили світла - просторовою щільністю потоку. Світильники ж локального освітлення, що працюють на відносно невеликих відстанях, які можна порівняти з розмірами цих приладів, характеризуються розподілом освітленості - щільністю потоку по поверхні.

Світлорозподіл прожекторів і світильників загального освітлення обумовлюється формою фотометричного тіла СП і описується кривими сили світла (КСС). При цьому під фотометричним тілом СП розуміють геометричне місце кінців радіусів-векторів, що виходять зі світлового центра приладу, довжина яких пропорційна силі світла приладу у відповідному напрямку. А кривою сили світла називається крива залежності сили світла СП від меридіональних і екваторіальних кутів, одержувана перетином фотометричного тіла СП площиною.

За видом фотометричних тіл СП поділяються на такі типи:

- круглосиметричні (їхні фотометричні тіла є тілами обертання);
- симетричні (їхні фотометричні тіла мають одну, дві й більше площин симетрії);
- несиметричні (їхні фотометричні тіла зовсім не мають елементів симетрії (рис. 2.1)).

Звичайний розподіл сили світла СП зображується на площині. Для цього утворюються перетини фотометричних тіл переважно наступними поверхнями: меридіональною напівплощиною, яку відкладають від вісі світлового приладу; екваторіальною площиною, перпендикулярною вісі приладу;

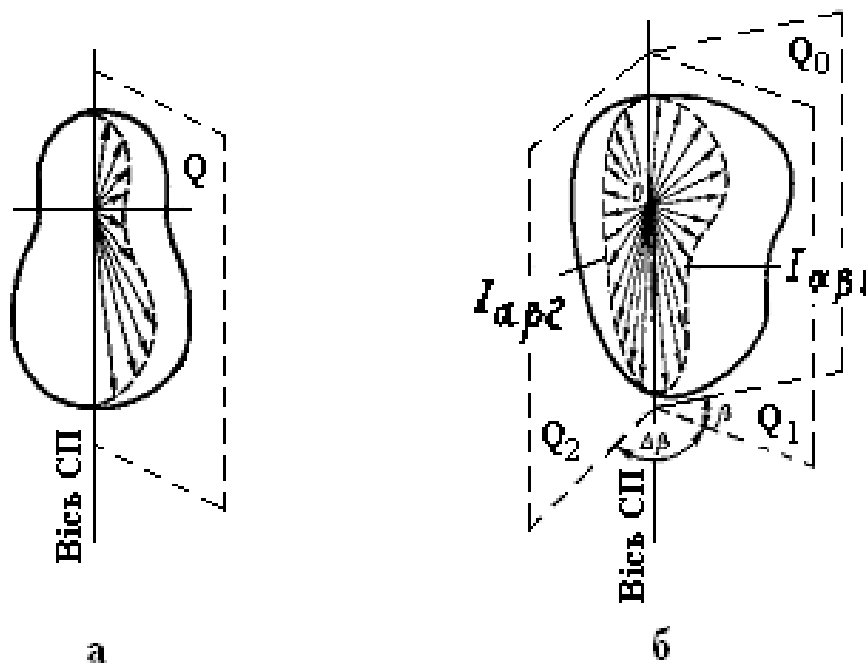


Рис. 2.1 – Перетин фотометричного тіла меридіональними площинами:
а – круглосиметричного;
б – несиметричного

конічною поверхнею з віссю, що становить вісь приладу й вершину в світловому центрі останнього.

Перетин фотометричного тіла СП із меридіональною напівплощиною утворить слід у вигляді кривої сили світла (КСС).

На рис. 2.2 наведені КСС різних типів СП.

Суцільними лініями позначені криві в головній поперечній площині (γ, δ, e) і меридіональній площині креслення (γ); пунктиром позначені криві в головній подовжній і меридіональній площинах, остання з яких перпендикулярна площині креслення.

До круглосиметричних СП належать розповсюджені круглосиметричні прожектори і світильники, фотометричне тіло яких має вісь симетрії, крім того концентрують потік у конусі (рис. 2.2 а, в), а також різні світильники, які спрямовують світловий потік достатньо рівномірно в межах усього навколишнього простору (рис. 2.2 г).

До симетричних належать прилади, що мають дві площини симетрії: світильники з лінійними лампами (ЛЛ, ксеноновими, галогенними ЛР тощо (рис. 2.2 д, е) і прожектори з лінійними лампами, що концентрують потік у віялі (рис. 2.2, б). Одну площину симетрії також мають світильники типу «Кососвітло» (рис. 2.2, г).

Світлові прилади з несиметричними фотометричними тілами є спеціальними приладами. На практиці вони зустрічаються рідко.

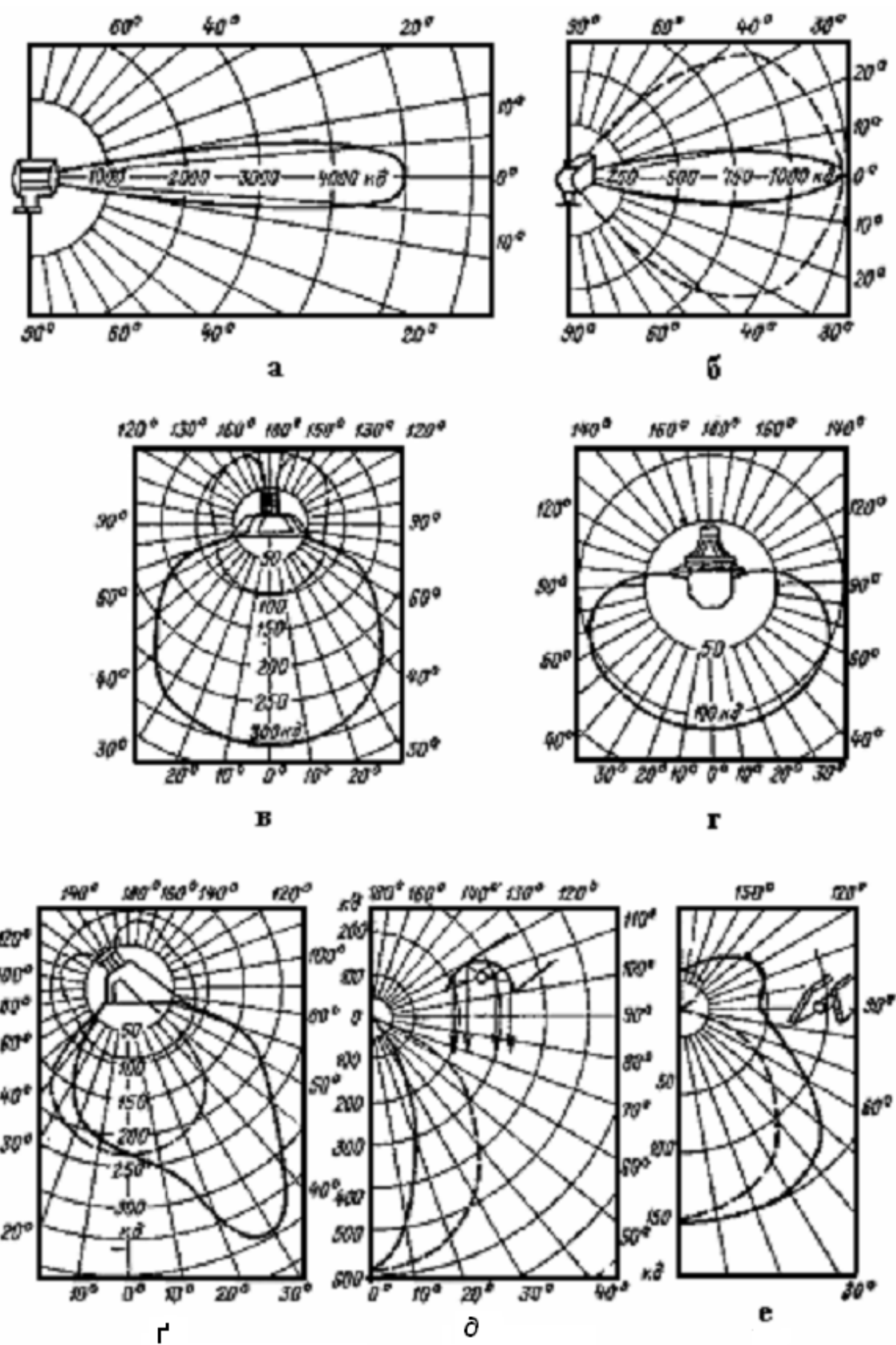


Рис. 2.2 – КСС різних типів СП

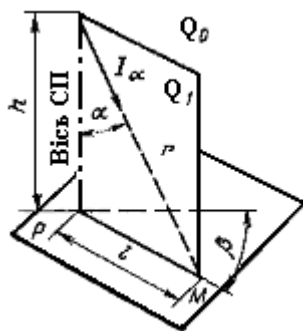


Рис. 2.3 – Система полярних кутів α, β і відстаней ρ

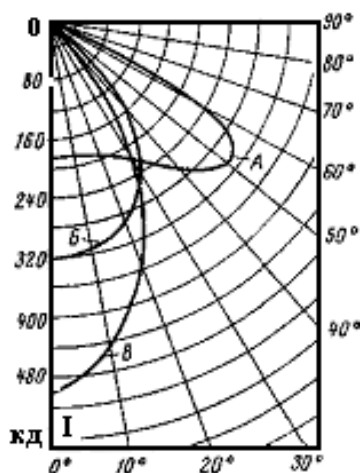


Рис. 2.4 – Сімейство кривих сили світла дзеркальних світильників із ЛЛ у поперечній площині

Залежність сили світла I від орієнтувального напрямку у просторі кутів α і β (крива сили світла - КСС) будується зазвичай у системах полярних чи прямокутних координат. При цьому для побудови КСС світильників, які скеровують потік у межах великих тілесних кутів, використовується переважно система полярних координат (рис. 2.3), для зображення КСС прожекторів із великою концентрацією світлового потоку - система прямокутних координат (рис. 2.4).

Щоб мати можливість порівнювати КСС різних СП із різним числом, потужністю й кольоровістю ламп, ці криві будують зазвичай для умовної лампи зі світловим потоком 1000 лм (для багатолампових приладів 1000 лм - сумарний потік n ламп). Фактичні значення сили світла СП із відомими

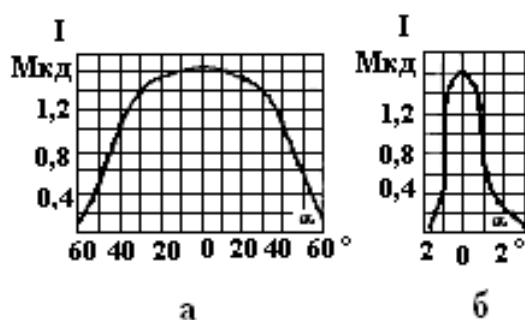


Рис. 2.5 – Крива сили світла прожектора з двома площинами симетрії (із параболоциліндричним відбивачем) у прямокутних координатах: а – у поздовжній площині; б – у поперечній площині

лампами, що працюють у визначених умовах цього приладу, одержують множенням значень сили світла, знайдених із кривої, на дійсний потік установлених у приладі ламп (у тисячах люменів).

Меридіональні КСС характеризують світлорозподіл у меридіональних площинах і виражаються функцією $I(\alpha)$ за $\beta = \text{const}$ (де кут β визначає положення цієї меридіональної площини стосовно головної подовжньої площини приладу) (рис. 2.3 і 2.5).

Екваторіальна КСС описує функцію $I(\beta)$ під різними кутами β за $\alpha = \text{const} = 90^\circ$ (рис. 2.5). Залежність $I(\beta)$ при $\alpha = \text{const} \neq 90^\circ$ можна отримати перетином фотометричного тіла приладу з конічними поверхнями з кутами α у вершині. Із цією метою радіуси-вектори сили світла проєктуються з конічної поверхні на екваторіальну площину (рис. 2.6).

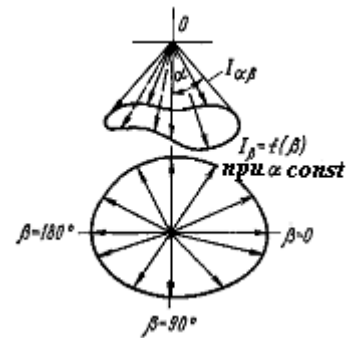


Рис. 2.6 – Конічні січні поверхні

Для опису світлорозподілу будь-якого круглосиметричного СП достатньо однієї меридіональної КСС, тому що фотометричне тіло такого приладу можна утворити обертанням цієї кривої довкола оптичної вісі (при зображенні в системі полярних координат). Для опису світлорозподілу симетричних приладів необхідне сімейство меридіональних КСС для різних січних меридіональних площин, кількість яких обирається виходячи з форми фотометричного тіла. Для приладів із двома площинами симетрії (насамперед, для світильників і прожекторів із лінійними лампами) зазвичай обмежуються приведенням КСС тільки у двох головних площинах - поздовжньої й поперечної (рис. 2.2, б, д, е). Для великої кількості випадків необхідно знати КСС не лише в нижній, але й у верхній півсфері простору.

Лінійні лампи мають зазвичай довжину, що у десятки разів перевищує їхній діаметр (у 10-60 разів для трубчастих ЛЛ різної потужності), тому необхідний перерозподіл потоку ламп у СП, можливо, переважно в поперечних площинах, у яких відбивач може охопити основну частину потоку ламп. У той же час у подовжніх площинах через велику довжину ламп технічно надзвичайно важко охопити відбивачем значну частину потоку й перерозподілити його у просторі. Унаслідок цього залежно від профілю, розмірів і характеру відбиття поверхні відбивача КСС приладів із лінійними лампами в поперечній площині можуть значно змінюватися (рис. 2.4), при цьому в подовжній площині їхній характер змінюється мало й залишається близьким до косинусного (рис 2.2, д, е).

2.1. Повна світлотехнічна класифікація світильників

Класифікація круглосиметричних світильників і світильників із двома площинами симетрії базується на двох незалежних ознаках світлорозподілу світильників: співвідношення потоків, які скеровуються світильником у верхню й нижню півсфери простору, і форма КСС.

Від співвідношення світлових потоків залежить розподіл яскравості основних поверхонь освітлюваного приміщення, які перебувають у полі зору. Від форми КСС залежать як характер розподілу освітленості, так і умови оптимального розташування світильників. Крім того, форма КСС визначає сліпучу дію світильників.

За класами світлорозподілу залежно від співвідношення світлового потоку, який скеровується в нижню півсферу, й усього світлового потоку світильники поділяються на п'ять класів, наведених у таблиці 2.1 і на рис. 2.7.

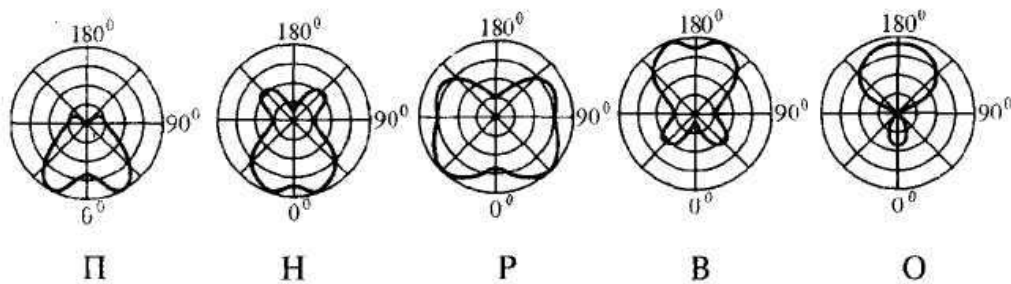


Рис. 2.7 – Класи світлорозподілу

Таблиця 2.1 – Класи світильників за світлорозподілом

Клас	Світловий потік угору	Світловий потік униз
П Світильник прямого світла	0-10 %	90-100 %
Н Світильник спрямованого світла	10-40 %	60-90 %
Р Світильник розсіяного світла	40-60 %	40-60 %
В Світильник переважно відбитого світла	60-90 %	10-40 %
О Світильник відбитого світла	90-100 %	0-10 %

Світильники класу П, Н, Р переважно використовуються для освітлення робочих просторів і вуличному освітленні. Світильники класу Р, В и О - декоративного освітлення житлових приміщень.

Останнім часом одержали поширення підвісні й підлогові світильники, характер світлорозподілу яких не укладається в названі п'ять класів. На відміну від світлорозподілу класів Н и В, у яких оптична система світильників формує КСС тільки в один бік, а світловий потік, спрямований у протилежний бік, спеціально не перерозподіляється, у нових світильників світловий потік чітко формується по обидва боки площини вихідного отвору («угору» й «вниз», (рис 2.8). ДСТУ такий клас світлорозподілу не передбачає.

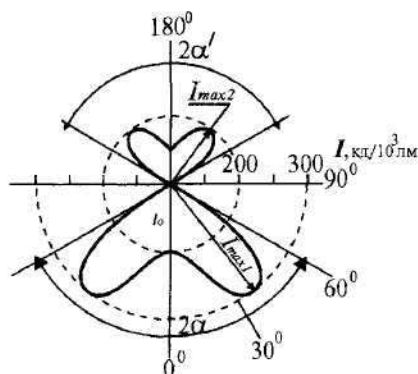


Рис. 2.8 – Світловий потік підвісних і підлогових світильників

Криві сили світла світильників зазначених класів у будь-яких меридіональних площинах

верхньої й нижньої півсфер залежно від їхньої форми поділяються на сім типів відповідно до таблиці 2.2 і рис. 2.9, 2.10

Таблиця 2.2 – Типи кривих сили світла світильників

Тип кривої сили світла		Зона спрямованої максимальної сили світла	Коефіцієнт форми кривої сили світла
Позначення	Найменування		
К	Концентрована	0° - 15°	$K_f \geq 3$
Г	Глибока	0° - 30°; 180° - 150°	$2 \leq K_f < 3$
Д	Косинусна	0° - 35°; 180° - 145°	$1,3 < K_f < 2$
Л	Напівширока	35° - 55°; 145° - 125°	$2 \leq K_f$
Ш	Широка	55° - 85°; 125° - 95°	$2 \leq K_f$
М	Рівномірна	0° - 180°	$K_f \leq 1,3$ при цьому $I_{\min} > 0,4 I_{\max}$
С	Синусна	70° - 90°; 110° - 90°	$1,3 < K_f$, при цьому $I_0 < 0,7 I_{\max}$

Примітка:

K_f - коефіцієнт форми кривої сили світла;

I_0 - значення сили світла в напрямку оптичної вісі світильника ($\alpha = 0$);

I_{\min} , I_{\max} - мінімальне та максимальне значення сили світла.

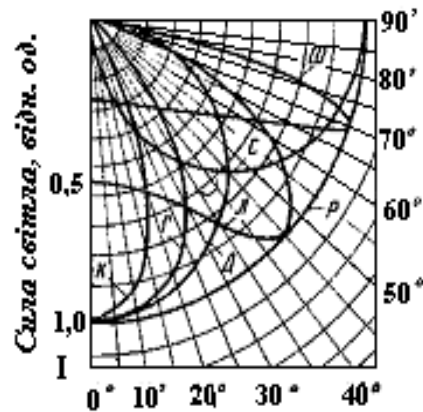
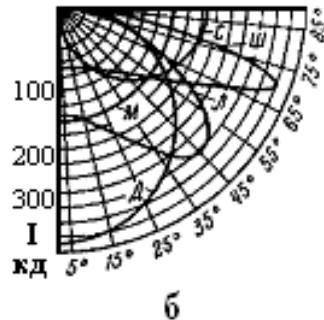
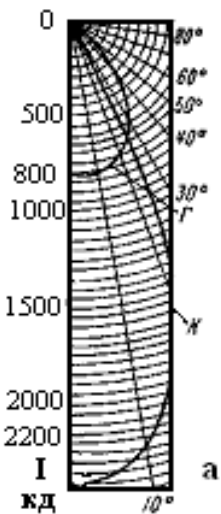


Рис. 2.9 – Типи кривих сили на на канделах для світлового потоку світильника ($\Phi_{\text{св}} = 1000 \text{ лм}$):

А - К, Г; б - Д, Л, М, С, Ш

Рис. 2.10 – Типи кривих сили світла в у відносних одиницях

Під коефіцієнтом форми K_f розуміють відношення максимальної сили світла I_{\max} у тій чи іншій меридіональній площині до умовного середньоарифметичного значення сили світла $I_{\text{ср}}$, визначеного для тієї ж площини за формулою:

$$I_{CP} = \frac{1}{9} \sum_5^{85} I_{\alpha} \quad \text{чи} \quad I_{CP} = \frac{1}{9} \sum_{175}^{95} I_{\alpha} \quad (2.1)$$

Значення сили світла I_{α} знаходять для кутів 5, 15, 25 ... 85° для нижньої півсфери та 175, 165, 155 ... 95° для верхньої півсфери.

Наведені в класифікації типові КСС можна виразити математично в такий спосіб:

- для концентрованої кривої $I_{\alpha} = I_0 \cos m\alpha$;
- для глибокої кривої $I_{\alpha} = I_0 \cos m\alpha$;
- для косинусної кривої $I_{\alpha} = I_0 \cos \alpha$;
- для напівширокої кривої $I_{\alpha} = I_0 \left[\frac{\cos \alpha}{\cos(\theta \sin^n C\alpha)} \right]$;
- для широкої кривої $I_{\alpha} = I_0 \left[\frac{\cos \alpha}{\cos(\theta \sin^n C\alpha)} \right]$;
- для рівномірної кривої $I_{\alpha} = I_0$;
- для синусної кривої $I_{\alpha} = I_0 \sin \alpha$;

Значення коефіцієнтів наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення параметрів математичних виражень типових кривих сили світла

Параметри	КСС			
	К	Г	Л	Ш
$I_{\theta}, \text{кд}$	2400	800	155	90
m	2,91	1,65	-	-
θ	-	-	70°	85°
n	-	-	1,2	1,5
C	-	-	1,7	1,2

Відповідно до класифікації кожному світильнику присвоюється класифікаційне світлотехнічне найменування, яке утворюється з найменувань класу за світлорозподілом і типом КСС. При цьому у класифікаційному найменуванні світильника зазвичай зазначено якій півсфері чи меридіональній площині властива типова КСС. У разі потреби можуть наводитися найменування кривих для обох півсфер і для декількох меридіональних площин. У найменуванні не вказується якій півсфері властива типова крива, якщо основною світлотехнічною характеристикою світильника є крива в нижній півсфері. У класифікаційному найменуванні світильників із лінійними лампами, що мають світлорозподіл із двома площинами симетрії, може наводитися лише назва типової кривої в поперечній площині без указівки на це, якій світлорозподіл, в тому випадку,

якщо КСС у подовжній площині є косинусною. Для світильників із круглосиметричним світлорозподілом у найменуванні не зазначається меридіональна площина, для якої наведена КСС. Допускається класифікація світильників лише за класами світлорозподілу, якщо вказівка типу КСС недоцільна, наприклад, для світильників місцевого освітлення, декоративних, побутових світильників. Світильники з КСС, що не відповідають ознакам, наведеним у таблицях 2.1 і 2.2 є світильниками спеціального світлорозподілу. Типові КСС круглосиметричних СП наведені у таблиці Б1, додатка Б.

Для характеристики світлорозподілу СП, особливо світильників, що мають КСС із чітким максимумом, застосовують поняття коефіцієнт підсилення $K_{y\alpha}$, під яким розуміють величину, яка характеризує посилення світильником сили світла лампи в заданому напрямку. При цьому для круглосиметричних приладів $K_{y\alpha}$ визначається відношенням сили світла приладу в певному напрямку до середньосферичної сили світла I_L круглосиметричної лампи:

$$K_{y\alpha} = \frac{I\alpha}{I_L} = \frac{I\alpha 4\pi}{\Phi_L}. \quad (2.2)$$

Для симетричних СП із лінійними лампами коефіцієнт підсилення визначається відношенням сили світла світильника в цьому напрямку до сили світла лампи (ламп) у цьому ж напрямку:

$$K_{y\alpha} = \frac{I\alpha}{I_{L\alpha}}. \quad (2.3)$$

Під коефіцієнтами підсилення зазвичай розуміють їхні максимальні значення для СП, тобто:

$$K_{y, \max} = \frac{I_{\max}}{I_{L, \max}} \quad (\text{для приладів із двома площинами симетрії});$$

$$K_{y, \max} = \frac{I_{\max \times 4\pi}}{\Phi_L} \quad (\text{для симетричних приладів}).$$

Для прожекторних приладів установлені показники, що характеризують світлорозподіл цих приладів:

- максимальна (вісьова) сила світла I_{\max} ;

- кут розсіювання, на межах якого сила світла складає $I_{\alpha} = 0,1I_{\max}$. Для деяких прожекторних приладів подекуди в якості кута розсіювання

приймають кут, на межах якого сила світла - $I_{\alpha} = 0,5I_{\max}$ (для прожекторів дальньої дії) чи $I_{\alpha} = 0,01I_{\max}$ (для світлових маяків). При цьому повною характеристикою світлорозподілу в пучку прожектора є тільки КСС.

2.2. Вторинні світлотехнічні характеристики

Розповсюдженими характеристиками світлорозподілу є характеристики розподілу освітленості, створюваної приладом:

- елементарні криві освітленості;
- криві відносної освітленості,
- просторові криві рівних значень горизонтальної освітленості.

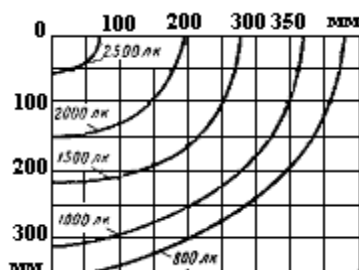


Рис. 2.11 – Криві рівних значень освітленості від світильника місцевого освітлення (із двома ЛЛ у 30 Вт при висоті вихідного отвору світильника над горизонтальною площиною 0,4 м)

Ці характеристики для СП є вторинними, тому що розраховуються на основі первинних (КСС).

Лише для світильників місцевого освітлення графіки рівних значень освітленості на площині, розташованій на визначеній висоті під приладами, є основною, первинною характеристикою (рис. 2.11).

Елементарні криві освітленості становлять побудовані у прямокутних координатах залежності освітленості від відстані l

(рис. 2.3) за заданої висоти h (рис. 2.12) і можуть будуватися для приладів як із лампами визначеної потужності, так і з умовним

світловим потоком 1000 лм. На кожному графіку (рис. 2.12) можуть сполучатися криві для декількох висот.

Освітленість у точці М при цьому запишеться у вигляді:

$$E_M = \frac{I_{\alpha} \cos \alpha}{r^2} = \frac{I_{\alpha} \cos^3 \alpha}{h^2}. \quad (2.4)$$

Крива відносної освітленості, під якою розуміють значення освітленості від приладу з умовною лампою 1000 лм при висоті $h = 1$ м, $\epsilon = I_{\alpha} \cos^3 \alpha$, також будується у прямокутних координатах. При цьому освітленість, створювана світильником із умовною лампою за конкретної висоти h , називається умовною освітленістю й позначається символом e :

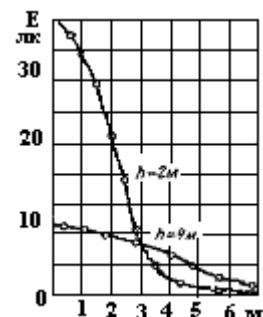


Рис. 2.12 – Елементарні криві освітленості

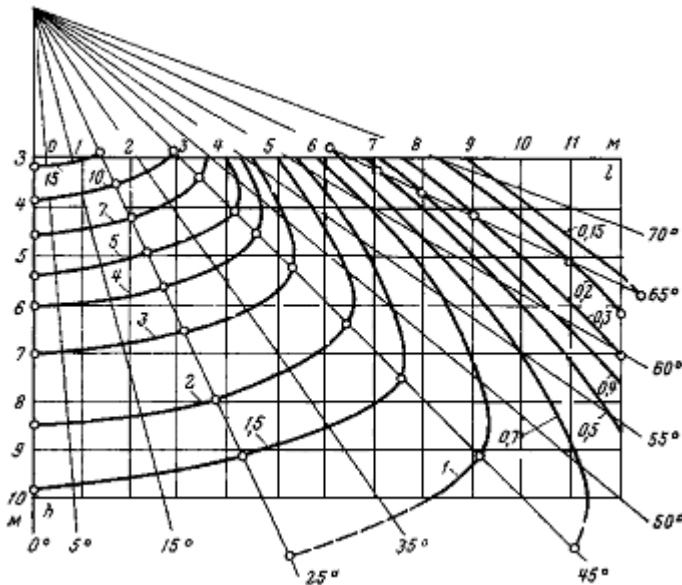


Рис. 2.13 – Просторові криві рівної умовної освітленості

плавною кривою. Будь-який промінь, проведений під кутом α , перетинатиме криві будь-якої освітленості e . Це добре видно з тієї ж перетвореної формули, на якій базується побудова графіків:

$$h = \sqrt{\frac{I\alpha \cos^3 \alpha}{e}} = \sqrt{I\alpha} \sqrt{\frac{\cos^3 \alpha}{e}}. \quad (2.6)$$

Ця формула дає другу координату точки з освітленістю e на напрямку α (першою координатою є сам кут α).

2.2.1. Характеристики яскравості

Для світлотехнічного розрахунку й оцінки всіх типів СП особливо важливі характеристики яскравості джерел світла й оптичних систем, що перерозподіляють їхнє випромінювання. Значення цих важливих для розробників СП параметрів пояснюється тим, що сила світла прожекторного СП чи дзеркального світильника визначається яскравістю і площею елементів оптичних систем, які є світлими в цьому напрямку. Значення яскравості можуть бути при цьому різними не лише для різних напрямків простору, але і для різних ділянок видимої світлої поверхні. Тому розв'язання задачі розрахунку яскравості світлої частини елементів оптичних систем у кожному напрямку простору є першочерговим для процесу світлотехнічного проектування багатьох типів СП. Значення яскравості видимих поверхонь світильників - величина, на яку безпосередньо реагує око людини. При цьому важливу роль відіграють значення яскравості як зовнішніх, так і внутрішніх поверхонь світильників, які є світлими у визначених напрямках. Це пов'язано з необхідністю обліку й обмеження як прямої, так і відбитої сліпучої дії світильників.

$$e = \varepsilon / h^2. \quad (2.5)$$

Просторові криві рівних значень умовної горизонтальної освітленості (рис. 2.13) будуються в нижчеописаний спосіб. Освітлюваний простір розрізається меридіональною площиною СП. Поміщена в будь-яку точку цього розрізу елементарна горизонтальна площадка буде орієнтована в системі координат l, h і залежно від її положення матиме ту чи іншу освітленість. Обравши з безлічі таких площадок усі ті, що мають задану e , з'єднують їх

Під час розгляду характеристик яскравості світильників важливим є розмежування й визначення габаритної та максимальної яскравостей. Під габаритною яскравістю L_g розуміють яскравість видимої світлої в цьому напрямку частини світильника, обумовлена відношенням сили світла світильника в цьому напрямку до площі проекції видимої світлої поверхні світильника на площину, перпендикулярну цьому напрямку:

$$L_g = I_a / S_a. \quad (2.7)$$

Максимальна яскравість L_{max} - яскравість найбільш яскравого в заданому напрямку ділянки поверхні світильника, що світить, площа якого дорівнює умовно обраному значенню 6,25 (1 кв. дюйм).

Необхідність використання двох величин яскравості L_g і L_{max} пояснюється тим, що під час спостереження за світильниками зазвичай одночасно видно поверхні, які мають різні яскравості. Тому, насамперед, нормують значення габаритної (середньої) яскравості. Однак, обмежитися таким нормуванням не можна, тому що при цьому не враховується можливість потрапляння в поле зору окремих ділянок світильників, які мають більш високі яскравості (наприклад, елементів поверхонь ламп, що світять) і можуть викликати підвищену сліпучу дію. Тому поряд з L_g у цілій низці випадків розглядаються також значення L_{max} або їхні співвідношення.

Нормовані значення яскравості різні для різних напрямків у просторі, оскільки сліпуча дія світильників не залишається постійною при зміні розташування світильників відносно зорової лінії. Крім того, імовірність спостереження за світильниками під різними кутами також неоднорівна. Найбільш сліпучу дію світильники чинять у межах кутів від 0 до 25° чи від 0 до 30° відносно зорової лінії. У зв'язку з цим значення яскравості зазвичай регламентуються не в усіх напрямках, а у двох-трьох кутових зонах простору.

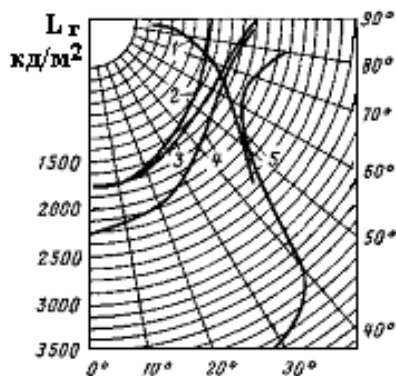


Рис. 2.14 – Значення габаритної яскравості світильників із ЛЛ

Приклад з рис. 2.14 показує зміну значень габаритної яскравості деяких розповсюджених типів світильників із ЛЛ в полярних координатах. Крива 1 демонструє зміну залежно від кута значення габаритної яскравості для екрануючого світильника з ґратами; 2 - 4 - для світильників з розсіювачами; 5 – для екранувальних світильників із ґратами і бічним подовжнім розсіювачем.

2.2.2. Захисні кути

Наявність у полі зору відкритих джерел світла призводить до засліплення. Отже, однією з найважливіших функцій світлотехнічної арматури є створення необхідного екранування яскравих частин джерел світла в межах визначених кутових зон простору. Таке екранування

створюється світлонепропускаючими чи світлорозсіювальними елементами освітлювальної арматури.

Кут, що характеризує зону, у межах якої око спостерігача захищене від прямої дії лампи, називається захисним кутом світильника. Він визначається кутом, укладеним між горизонталлю та лінією, дотичною до тіла лампи, що світить, краю чи відбивача непрозорого екрана (рис. 2.15, 2.16).

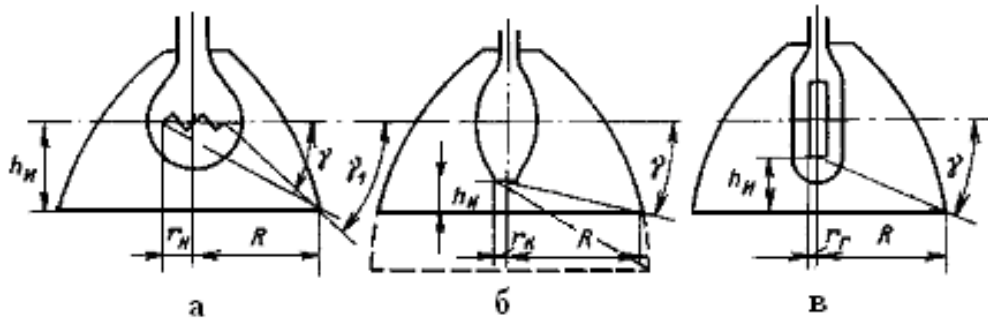


Рис. 2.15 – Захисні кути світильників: а – світильник із ЛР; б - світильник із ДРЛ чи з лампою зі світлорозсіювальною колбою; в – світильник з МГЛ чи НЛВТ із прозорою зовнішньою колбою

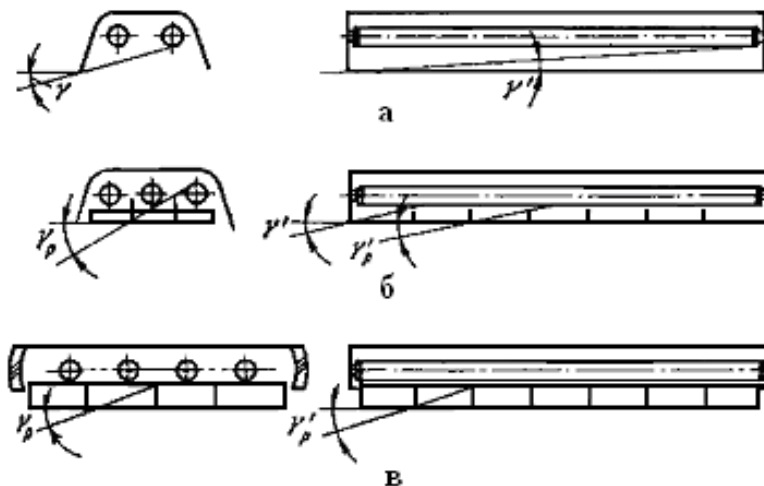


Рис. 2.16 – Захисні кути світильників із ЛЛ: а - відкритий світильник; б - світильник з екранувальними ґратами; в - світильник із екранувальними ґратами і бічним розсіювачем

Кут, що характеризує зону, у межах якої яскравість тіла лампи, що світить, лише зменшена до припустимих значень за допомогою розсіювачів екранів, зроблених зі світлопропускаючих матеріалів, називається умовним захисним кутом.

Захисний кут γ для круглосиметричних світильників (рис. 2.15) може бути визначений за допомогою співвідношення:

$$\gamma = \arctg \frac{h_H}{R + r} , \quad (2.8)$$

де h_u - відстань від тіла лампи, що світить, до площини вихідного отвору відбивача світильника;

R - радіус вихідного отвору відбивача світильника;

$r = r_n$ - радіус умовного кільця тіла розжарювання ЛР;

$r = r_k$ - радіус точки торкання дотичної до колби лампи ДРЛ;

$r = r_2$ - радіус пальника газорозрядної лампи високого тиску у прозорій колбі.

Значення захисного кута може значно змінюватися залежно від розмірів і форми тіла джерела, що світить, світла, його розташування в освітлювальній арматурі й розміру вихідного отвору відбивача. Для створення рівних значень захисних кутів у світильниках із ЛР (рис. 2.15, а) і з лампою ДРЛ (рис. 2.15, б), що має великі розміри тіла, яке світить, необхідні більш глибокі відбивачі для світильниках із ДРЛ, накреслені пунктиром на рис. 2.15, б.

На відміну від круглосиметричних світильників, у світильниках із двома площинами симетрії (у лінійних лампах) захисні кути γ і γ' у різних площинах різняться. У подовжній площині захисний кут γ' , що створюється лише торцевими стінками розсіювачів або відбивачів, зазвичай значно менший за кут γ у поперечній площині через більшу довжину ламп (рис. 2.16).

Створення в подовжній площині необхідного захисного кута тільки за допомогою відбивача пов'язане із застосуванням доволі громіздких і глибоких відбивачів. Трохи легше (особливо для багатолампових світильників) створити достатній захисний кут у поперечній площині. Тому найбільш розповсюдженою умовою створення необхідних захисних кутів у світильниках із ЛЛ є застосування різних екранувальних ґрат чи планок (рис. 2.16). Принцип дії екранувальних ґрат полягає в тому, що весь вихідний отвір світильника розчленовується стінками ґрат на низку дрібних елементів, у межах кожного з яких можна створити будь-який нормований захисний кут без збільшення розмірів світильників.

Захисний кут γ_p , створюваний екранувальними ґратами визначаються загалом виразом:

$$\gamma_p = \arctg \frac{h_p}{a}, \quad (2.9)$$

де h_p - висота планок екранувальних ґрат;

a - сторона осередку ґрат у площині, у якій визначається захисний кут.

Використання екранувальних ґрат із непросвічуючих чи світлопропускаючих матеріалів призводить до визначеної зміни форми КСС світильників. Це зміна зазвичай виражається у значному зниженні сили світла в межах захисного кута й у певному підвищенні (у низці випадків) значення сили світла під кутами, близькими до вісі світильника.

2.2.3. Коефіцієнт корисної дії

У кожному СП відбувається втрата частини світлового потоку лампи. Природно, чим менші ці втрати, тим економічніший прилад. Коефіцієнт, що показує, яку частку складає світловий потік світлового приладу $\Phi_{СП}$ від світлового потоку встановлених у ньому ламп $\sum \Phi_L$, називається коефіцієнтом корисної дії (ККД) η :

$$\eta = \frac{\Phi_{СП}}{\sum \Phi_L} . \quad (2.10)$$

Для світильників дуже важливо знати, яка частка світлового потоку ламп спрямовується у верхню й нижню (стосовно світильника) півсфери простору, у зв'язку з чим вводяться складники ККД η_B і η_H :

$$\eta_B = \frac{\Phi_{CB}}{\sum \Phi_C} ; \quad \eta_H = \frac{\Phi_{CH}}{\sum \Phi_C} , \quad (2.11)$$

при чому:

$$\eta_C = \eta_B + \eta_H . \quad (2.12)$$

Для характеристики прожекторів і проекторів важливо знати, яку частину світлового потоку, що вийшов із них, можна використати з користю. Корисно використовуваний світловий потік залежить від КСС і характеристик освітлюваного об'єкта. Тому для прожекторів, проекторів і деяких типів світильників корисним потоком Φ_P називається потік, утворений у корисному куті випромінювання:

$$\eta_P = \eta_u = \frac{\Phi_P}{\sum \Phi_L} , \quad (2.13)$$

де u - коефіцієнт використання світлового потоку в корисному куті випромінювання.

Для тих СП, світловий потік ламп яких залежить від температури навколишнього середовища (насамперед, для світильників із ЛЛ) і положення лампи для ЛЛ і МГЛ і може змінюватися при використанні цих ламп у різних конструкціях приладів, введені поняття оптичного й експлуатаційного ККД.

Оптичний ККД світильника η_o - коефіцієнт, що показує, яку частку складає світловий потік світильника від номінального світлового потоку встановлених у ньому ламп без обліку впливу навколишнього середовища, теплового режиму приладу й положення лампи.

Експлуатаційний ККД світильника η_{ε} - коефіцієнт, що показує, яку частку складає світловий потік світильника, що працює за цих умов $\Phi_c(t)$, від світлового потоку встановлених у ньому ламп $\sum \Phi_L(t_H)$. При цьому під світловим потоком ламп розуміють потік, який створюють останні під час

роботи поза світильником, у визначеному положенні й за номінальної температури навколишнього середовища $t_H = +25^\circ \text{C}$:

$$\eta_B = \frac{\Phi_{CB}}{\sum \Phi_C(t_H)} . \quad (2.14)$$

Для СП, у яких η_ϕ знижується в переважно під впливом температури:

$$\eta_B = \eta V(t) , \quad (2.15)$$

$$\text{де - } V(t) = \frac{\Phi_L(t)}{\Phi_L(t_H)} ,$$

$\Phi_L(t)$ - значення світлового потоку лампи під час роботи у світильнику за температури t навколишнього повітря.

Для СП прожекторного типу мають визначене значення низка коефіцієнтів, що характеризують ефективність використання потоку лампи оптичною системою приладу.

Коефіцієнт використання оптичної системи - відношення світлового потоку Φ_ϕ , що потрапляє від джерела на елементи оптичної системи, до потоку джерела Φ_L :

$$u_{o.c} = \frac{\Phi_\phi}{\Phi_L} . \quad (2.16)$$

Коефіцієнт корисної дії оптичної системи характеризує частину, що складає корисний світловий потік приладу Φ_n від потоку, що потрапив на оптичну систему Φ_ϕ :

$$\eta_{o.c} = \frac{\Phi_n}{\Phi_\phi} . \quad (2.17)$$

Коефіцієнт корисної дії СП залежить як від $u_{o.c}$, так і від $\eta_{o.c}$, тобто визначається як параметрами принципової схеми оптичної системи, так і параметрами використаних світлотехнічних матеріалів, конструктивним рішенням СП, від якого значнішою мірою залежить ефективність використання світлового потоку (наявність і ступінь екранувань, відсутність «пасток» світла тощо).

2.2.4. Світловий потік СП

Випромінюваний СП світловий потік у підсумку є однією з найважливіших функцій світлотехнічних характеристик. Нормуються не лише первинні світлові потоки нових приладів, але і змінені у процесі експлуатації за визначених технічною документацією режимів

обслуговування. Важливими характеристиками економічності світильників є питомі значення світлових потоків приладів на одиницю споживаної потужності (з урахуванням утрат потужності у ПРА) Φ_p (лм/Вт) чи на одиницю маси Φ_m (лм/кг):

$$\Phi_p = \frac{\Phi_c(t)}{P_L + P_{ПРА}} = \frac{\sum \Phi_L(t_H) \eta_{\Sigma}}{\kappa P_L} = \frac{\sum \Phi_L(t_H) \eta V(t)}{\kappa P_L}, \quad (2.18)$$

де κ - коефіцієнт, що показує, наскільки споживана СП потужність більша за потужність установлених у ньому ламп.

$$\Phi_m = \frac{\Phi_c(t)}{M} = \frac{\sum \Phi_L(t_H) \eta V(t)}{M}, \quad (2.19)$$

де M - маса СП із урахуванням ПРА, акумуляторних батарей, сполучних дротів тощо.

Велике значення мають характеристики сталості світлового потоку приладу в часі. Це особливо важливо для СП із газорозрядними лампами, для яких характерна пульсація випромінювання під час роботи в мережах змінного струму. Ступінь пульсації значно залежить від типу ламп, електричної схеми СП, частоти живильного струму й визначається коефіцієнтом пульсації K_p освітленості на робочих поверхнях:

$$K_p = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{CP}} \cdot 100\%, \quad (2.20)$$

де E_{\max} і E_{\min} - максимальне й мінімальне значення освітленості за період T :

$$E_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T E(\tau) d\tau$$

- їхнє середнє значення освітленості за цей період при зміні часу τ .

Мінімальні коефіцієнти пульсації світлового потоку можна отримати, якщо встановити в один СП три лампи й живити останні від трьох фаз мережі.

2.2.5. Структура випромінювання

Під структурою випромінювання розуміють його спектральний склад і ступінь поляризації.

Спектральний склад випромінювання СП визначається як параметрами джерел світла, так і характеристиками матеріалів, які застосовують для виготовлення розсіювачів, фільтрів, відбивачів, захисних стекол та інших елементів.

Спектральний склад випромінювання ДС, які використовуються у СП різний. Спектри випромінювання окремих ДС наведені в главі 3.

Вимоги до інтенсивності випромінювання в різних спектральних зонах важливі для СП у картинних галереях і музеях (де випромінювання впливає на вицвітання фарб картин), вітринах холодильників із продуктами, що швидко псуються під впливом тепла, операційних, залах засідань тощо. Випромінювання в ІЧ діапазоні у СП цього призначення має бути різко знижене. Одним із варіантів вирішення такого типу завдань є застосування у відбивачах багатошарових інтерференційних покриттів.

Для значного підвищення коефіцієнта відбиття в необхідному спектральному діапазоні використовують явище багатопроменевої інтерференції. Технічно це реалізовується за допомогою нанесення на поверхню відбивача періодичної багатошарової системи плівок із чергуванням високого й низького показників переламлення. Відбиті від усіх шарів хвилі перебувають в однакових фазах, підсилюючи одна одну, отже, відбувається збільшення коефіцієнта відбиття разом із малим поглинанням. Використання багатошарових покриттів дозволяє значно підвищити ККД СП (коефіцієнт відбиття до 0,96); поліпшити тепловий режим СП, тому що через багатошарове покриття може проходити до 80 % ІЧ випромінювання, яке випускає ДС і падає на відбивач; зменшити теплонадходження від СП в освітлюване приміщення, особливо, якщо вони вбудовані у стелю.



Рис. 2.17 - Світильники зі зміною кольору

Кольорові стекла і плівки в сигнальних приладах, різнобарвні розсіювачі з пластмаси, тканини, плівки, силікатні стекла у світильниках для житлових і громадських будівель широко застосовуються й використовуються у світлотехнічній арматурі як у функційних, так і в декоративних цілях. Вимоги до кольоровості

випромінювання актуальні для рекламного освітлення і СП, які застосовують у світлотехнічних шоу.

Для динамічного кольорового підсвічування стін і деталей інтер'єру використовуються світильники зі зміною кольору. Ці прилади мають колесо з дихроїчними світлофільтрами й дозволяють обирати потрібний колір на пульті керування (рис. 2.17).

Ступінь поляризації світлового потоку у світлових приладах залежить як від ступеня поляризації випромінювання джерел світла, так і від структури та конструкції відбивачів і розсіювачів, які беруть участь у перерозподілі світлового потоку.

Лазери та р-п переходи світлодіодів здебільшого випромінюють поляризоване світло. Для всіх інших джерел світла в разі потреби випромінювання поляризують за допомогою світлотехнічної арматури,

застосовуючи багат шарові поляризаційні панелі, відбиття в багат шарових дзеркалах (поляризатор Брюстера) тощо.

Лінійно поляризоване світло застосовують у медицині. Промені глибоко проникають у біотканини, чинячи загальну біостимулюючу дію. Опромінення клітин рослин поляризованим випромінюванням викликає виділення цими клітинами речовин, що стимулюють ріст. При використанні світильників поляризованого світла видимість об'єктів у деяких освітлювальних установках удвічі більша, ніж у світильниках, що створюють природне неполяризоване освітлення. Особливо помітна ефективність поляризованого світла під час роботи із блискучими діелектриками (склами, пластмасами, глянсовим папером тощо). Поляризація випромінювання джерел світла є одним з найбільш ефективних способів зниження прямої та здебільшого відбитого блиску світильників. Ще у 60-і рр. висувувалася пропозиція наклеїти на фари всіх автомобілів поляризаційні плівки, щоб уберегти водіїв від засліплення дальнім світлом. Така ж плівка, але із перпендикулярним відносно першого куту поляризації, має наклеюватися на лобове скло автомобіля, або мають застосовуватися аналогічні окуляри. Це не вимагає принципових змін конструкції фар, однак, проблема зниження яскравості фар на 40 % не дозволила цій ідеї реалізуватися. Схема поляризації фар докладно описана в главі 4.

Питання для самоперевірки

1. Які параметри світлових приладів називаються світлотехнічними?
2. Якими характеристиками описується світлорозподіл прожекторів і світильників, які використовуються на великих відстанях від освітлюваних об'єктів, а якими - світлорозподіл світильників локального освітлення?
3. Що таке фотометричне тіло?
4. Що таке крива сили світла?
5. Як класифікуються світлові прилади за видами фотометричних тіл?
6. Які поверхні утворюють перетин фотометричних тіл, відбиваючи розподіл сили світла?
7. У яких випадках для зображення залежності сили світла від кутів доцільно використовувати систему полярних координат?
8. Які ознаки світлорозподілу покладені в основу повної светотехнічної характеристики круглосиметричних світильників?
9. На які класи поділяються світлові прилади залежно від співвідношення світлового потоку, який скеровується в нижню півсферу, і всього світлового потоку?
10. Який тип світлорозподілу не передбачений ДСТУ?
11. Який параметр розуміють під коефіцієнтом форми кривої сили світла?

12. У якому випадку доцільно характеризувати криву сили світла за коефіцієнтом посилення?
13. Які додаткові характеристики вводять для опису світлорозподілу прожекторних приладів?
14. Яка характеристика розподілу світлового потоку є основною для світильників локального освітлення?
15. У чому полягає відмінність елементарних кривих освітленості, кривих відносної освітленості та просторових кривих рівних значень горизонтальної освітленості?
16. Наведіть визначення габаритної й максимальної яскравостей видимих поверхонь світильників. Чому необхідно використовувати дві величини яскравості одночасно?
17. Яким параметром описується функція світлотехнічної арматури - утворення необхідного екранування яскравих частин джерел світла?
18. Чим викликана необхідність використання екрануючих ґрат у світильниках з ЛЛ і як при цьому змінюється крива сили світла приладу?
19. Які існують види коефіцієнтів корисної дії світлового приладу та від яких параметрів вони залежать?
20. Якими функційними світлотехнічними характеристиками описується світловий потік?
21. Для яких джерел світла особливо актуальний коефіцієнт пульсацій? У який спосіб його знижують?
22. Які параметри розуміють під структурою випромінювання? Чому в окремих випадках доводиться змінювати спектральний склад випромінювання джерел світла за допомогою світлотехнічної арматури світлового приладу?

3. ОПТИЧНІ СИСТЕМИ СП

Головну роль у перетворенні світлового потоку джерел світла відіграє оптична система СП, які складається з елементів, що беруть участь у зазначеній трансформації світла відповідно до основних законів геометричної оптики, а саме:

1. Закон прямолінійного поширення світла, відповідно до якого в однорідному прозорому середовищі світло між двома точками поширюється за прямою лінією;

2. Закон незалежності поширених пучків, сутність якого полягає в наступному: якщо у просторі зустрічаються пучки променів, які йдуть у різних напрямках, то вони не впливають один на одного.

3. Закон відбиття світла. Зустрічаючи на шляху дзеркальні чи просто гладкі (поліровані) поверхні, світлові промені повністю чи частково відбиваються, причому падає промінь, який нормаль відбивної поверхні і відбитий промінь лежать в одній площині, а кути відбитого променя і променя, що падає, з нормаллю рівні за абсолютною величиною, але протилежні за знаком.

4. Закон заломлення світла. Промінь світла під час переходу з одного прозорого середовища в інше на межі їхнього розподілу не тільки частково відбивається, але і заломлюється. Унаслідок заломлення відбувається зміна напрямку променя. Математично закон заломлення можна виразити в такий спосіб:

$$n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon', \quad (3.1)$$

де n і n' - коефіцієнти заломлення двох середовищ; ε і ε' - кути заломленого променя та променя, що падає з нормаллю відповідно.

До оптичних елементів належать відбивачі, заломлювачі, розсіювачі, захисні стекла, екрануючі ґрати й кільця, світлофільтри, поляроїди, діафрагми, екрани, різні світловоди.

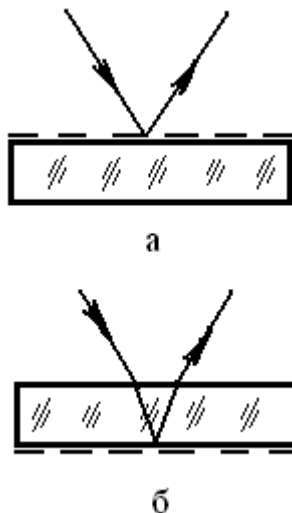


Рис 3.1 – Дзеркало із зовнішнім з внутрішнім відбиттям

3.1. Відбивальні оптичні системи

Відбивачі - найважливіші елементи оптичних систем СП, що перерозподіляють світловий потік ламп на основі законів відбиття світла. Вони поділяються на дзеркальні, дифузійні й матові, що діють відповідно на основі законів дзеркального дифузійного і спрямованно-розсіяного відбиття.

Дзеркалом називають оптичну деталь, обмежену однією відбивальною поверхнею. Ця поверхня може бути плоскою, сферичною й асферичною, тобто такою, що відрізняється від сфери. Дзеркало

може бути з зовнішнім та внутрішнім відбиттям (рис. 3.1).

Оптичні відбивальні системи СП складаються здебільшого із увігнутих чи плоских дзеркальних відбивачів. При цьому відбивачі можуть бути суцільними і складеними. Поверхня відбивачів може бути гладкою, хвилястою, офактуреною, ламаною тощо.

В основних видах дзеркальних відбивачів використовують оптичні властивості параболічних, еліптичних, гіперболічних, циліндричних і плоских дзеркальних поверхонь, а також поверхонь, що сполучають їхні особливості.

Важливою властивістю параболи (рис. 3.2), математичне вираження якої, як відомо, $z^2 = 4fx$, є відбиття всіх променів від джерела світла, розташованого у фокусі F параболи, у напрямку оптичної вісі.

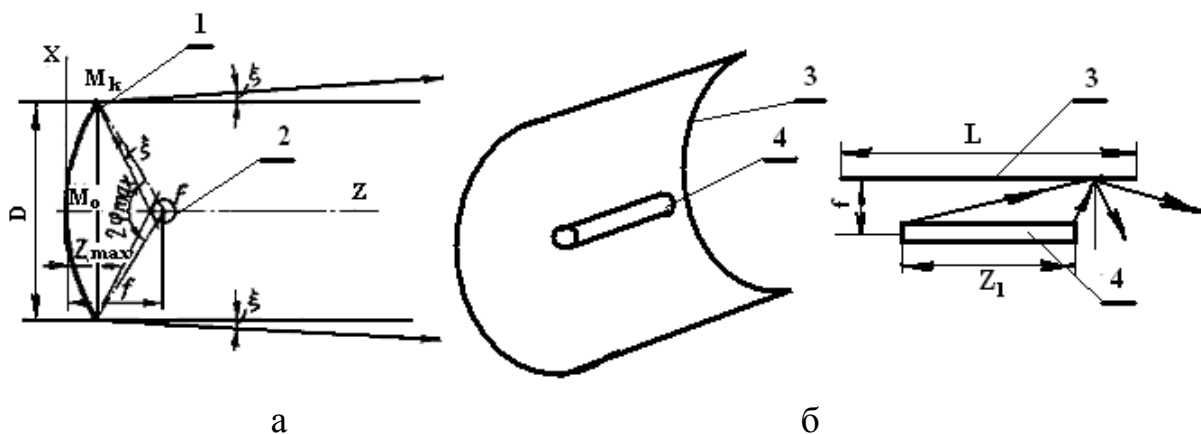


Рис. 3.2 – Властивості дзеркальної параболічної поверхні:

а - для сферичного джерела випромінювання; б - для циліндричного джерела випромінювання; 1 - параболоїда обертання; 2 - джерело випромінювання у вигляді сфери; 3 - параболо-циліндрична поверхня; 4 - циліндричне джерело випромінювання

Використання цієї властивості параболи дозволяє одержувати найбільшу концентрацію випромінювання в необхідних напрямках простору. Із обертанням параболи довкола оптичної вісі утвориться поверхня другого порядку - параболоїд обертання - один із основних видів відбивачів світлових приладів прожекторного типу.

Зі спрямуванням параболи в напрямку, перпендикулярному оптичній вісі, створюється параболо-циліндрична поверхня, яка широко застосовується у відбивачах СП із лінійними джерелами світла. Відношення вісьової сили світла такого прожектора до сили світла джерела дорівнює відношенню поперечника відбивача D до діаметра тіла, що світить, d (при $\rho = 1$).

Відбивачі параболоїдної форми виготовляються з металу і скла. У металевих відбивачах відбиття світла відбувається на передній поверхні, що й обробляється за параболоїдною формою. У скляних відбивачів відбивний шар, розташований на тильній поверхні скляного тіла відбивача. Світловий промінь із фокуса відбивача, упавши на лицьову поверхню в точці А (рис. 3.3), заломлюється і входить у скло, частково відбиваючи від його лицьової поверхні уздовж оптичної вісі відбивача в напрямку AA'.

Дійшовши тильної поверхні, заломлений промінь відіб'ється в точці В й у напрямку ВС вийде назовні. У точці С промінь вийде зі скла в напрямку СС', частково відбивши при цьому назад у скло в напрямку CD. Промінь CD так само як і основний промінь АВ, у скляному тілі відбивача піддається поглинанню й відбиттю і, досягши лицьової поверхні відбивача, вийде основною своєю частиною за напрямком ЕЕ', при цьому частково відіб'ється назад у скло в напрямку EG тощо. Звідси видно, що світловий потік, відбитий скляним відбивачем, складається з окремих променів, які вийшли внаслідок відбиття та заломлення.

Прийнявши весь відбитий світловий потік скляного відбивача за 100 %, одержуємо: перший складник відбитого променя дає близько 5 %, другий - 91,5 % і третій - 3,5 %.

У скляних відбивачів з великим кутом охоплення

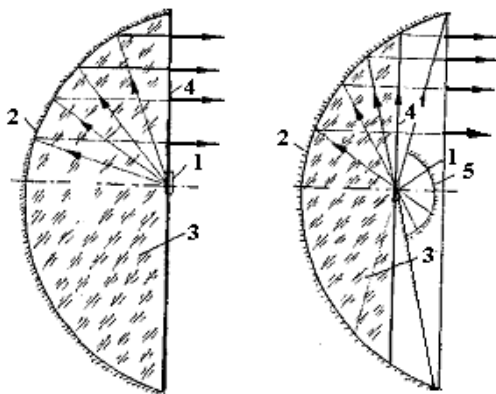


Рис. 3.4 – Твердотілий світлодіодний прожектор із параболоїдним відбивачем: 1 - світлодіод; 2 - параболоїдний відбивач; 3 - прозоре тіло; 4 - прозора порожнина; 5 - контрвідбивач кутів падіння променя.

Поява світлодіодів великої потужності стимулювала розробку нових, оригінальних конструкцій прожекторів на їхній основі. Низкою авторів (Ю. А. Цюпак, О. А. Лебедев, В. Е. Сабінін, С. В. Солк) було запропоновано дзеркально-лінзові системи світлодіодних прожекторів (деякі з яких показано нижче). На рис. 3.4 поданий твердотілий світлодіодний прожектор із параболоїдним відбивачем.

У цих системах випромінюючий кристал розташовується у фокусі параболічного дзеркала з різною орієнтацією убік світлового отвору чи від нього. Ці варіанти оптичної системи, що розглядаються як експериментальні

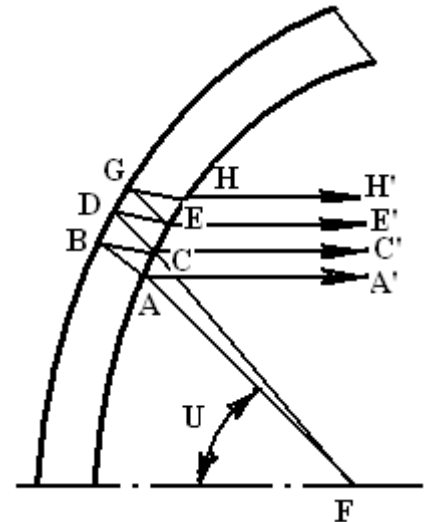


Рис. 3.3 – Хід променів у скляному відбивачі

я за тієї ж якості скла й відбивного шару загальний коефіцієнт відбиття практично залишиться незмінним, але значно зміниться питома вага кожного з трьох складників. Наприклад, для крайньої зони відбивача з кутом охоплення $2U_{\max} = 280^\circ$ загальний коефіцієнт відбиття в такому випадку складе 86,9 %, при цьому перший складник буде дорівнюватиме 20 %, другий - 68 %, третій - 12 %, що пояснюється різними значеннями коефіцієнта френелівського відбиття для різних

зразки, поширення у промисловості не одержали.

На рис. 3.5 наведені різні конструкції дзеркально-лінзових систем світлодіодних прожекторів.

У першій схемі випромінюючий кристал схований у глибині пластмаси, що не покращує теплового режиму навіть із застосуванням теплознімача.

Друга схема відрізняється складністю форми оптичної системи й завищених габаритів щодо фокусної відстані параболоїдного відбивача (у діаметрі $D \approx 6f$ і приблизно стільки ж за глибиною). Ще більш габаритна ($D \approx 8f$) третя схема дзеркально-лінзового світлодіодного прожектора.

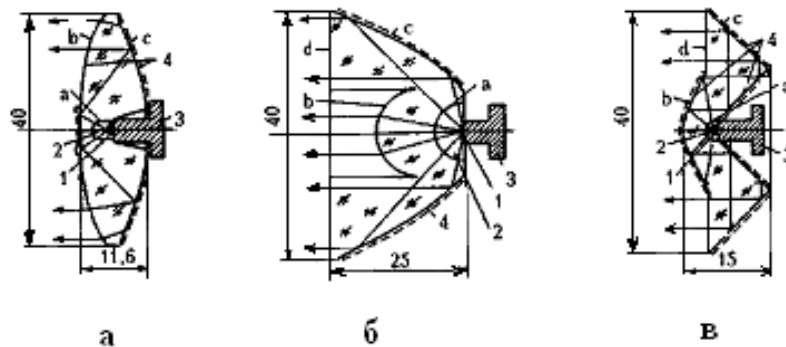


Рис. 3.5 – а - Оптичний елемент із асферичними (а, b, c) робочими поверхнями:

1 - випромінюючий кристал; 2 - порожнина з іммерсійним середовищем; 3 - теплознімач; 4 - дзеркалізовані ділянки; б - Оптичний елемент зі сферичною (а), еліптичною (b), параболічною (c) і плоскою (d) поверхнями; в - Оптичний елемент зі сферичною (а), параболічною (b), w-подібною (c) і плоскою (d) поверхнями

Найбільш простою, компактною й ефективною є твердотільна повноохоплююча оптична система світлодіодного прожектора, наведена на рис. 3.6.

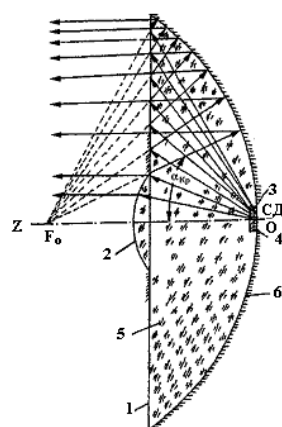


Рис. 3.6 – Твердотіла дзеркально-лінзова повноохоплююча система світлодіодного прожектора : 1 - прозора площина; 2 - центральна лінза; 3 - випромінюючий кристал; 4 - вершина відбивача; 5 - прозоре тіло; 6 - параболоїдний відбивач

Тут плоска поверхня (1) прозорого тіла розташовується посередині фокусної відстані основного параболоїдного відбивача (2) перпендикулярно його оптичній вісі.

Випромінюючий кристал розташовується в недзеркалізованій ділянці вершини відбивача. Промені світла, які розходяться з

кристала (3) під кутами до оптичної вісі, що перевищують критичний кут повного внутрішнього відбиття $\alpha_{кр}$, відбиваються від цієї поверхні, розходячись ніби уявного відбиття кристала у плоскій поверхні (4), що збігається з фокусом основного відбивача F. Тому, відбившись від нього, вони вільно виходять крізь прозору площину паралельно оптичній вісі.

Промені випромінювання кристала, що примикають до оптичної вісі параболоїдного відбивача в межах критичного кута повного внутрішнього відбиття прозорого тіла, охоплюються коліматорною лінзою (5) і спрямовуються останньою вздовж оптичної вісі. Разом ці компоненти випромінювання кристала охоплюються плоским кутом у 1410 півпростори.

Таким чином, усе випромінювання кристала в півсфері концентрується уздовж загальної оптичної вісі оптичної системи прожектора.

Дія еліпсоїдних відбивачів, поверхня яких утворена внаслідок обертання частини еліпса довкола вісі, заснована на властивості еліпса збирати в одному з фокусів усі відбиті промені, що вийшли з іншого фокуса (рис. 3.7).

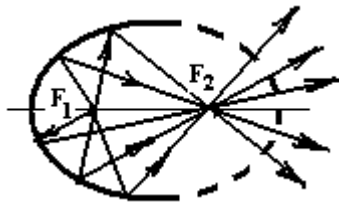


Рис. 3.7 – Властивість дзеркальної еліптичної поверхні

Рівняння еліпса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1, \quad (3.2)$$

де a і b - половини довжин великої й малої вісей еліпса. Еліпсоїд обертання забезпечує найбільшу концентрацію випромінювання джерела в точці (чи області, якщо джерело випромінювання відрізняється від точки) на вісі світлового приладу.

Так само, як і параболо-циліндричну, можна отримати й еліпсоциліндричну поверхню дзеркального відбивача для концентрації випромінювання лінійних джерел.

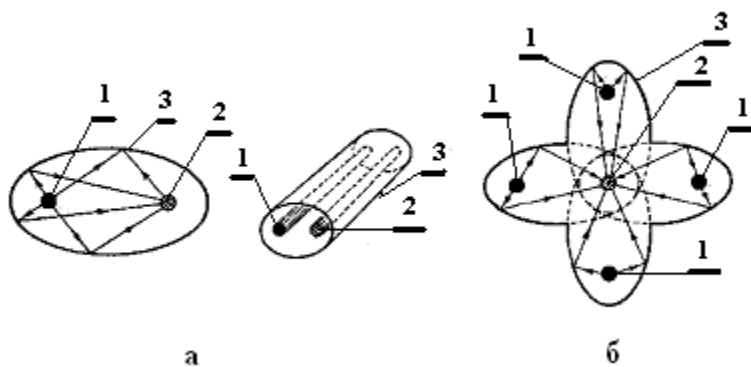


Рис. 3.8 – Використання закритих еліпсоциліндричних відбивачів: 1 - імпульсна лампа накачування; 2 - робоча речовина (рубіновий, неодимовий стрижень); 3 - відбивач

Поширення набули закриті еліпсоциліндричні відбивачі в системах накачування твердотілих лазерів, робочою речовиною яких є тверде тіло: кристал, скло з домішками активних атомів (рис. 3.8, а).

В одному фокусі розміщується лампа накачування, в другому - робоче тіло лазера. Така конструкція дозволяє спрямувати

випромінювання імпульсної лампи 1 на робоче тіло лазера 2. При цьому досягається доволі гарна рівномірна освітленість.

Використовуються також відбивачі у вигляді декількох сполучених еліпсів, у яких один із фокусів є сполучним (рис. 3.8 б).

Можливі різні варіанти дзеркальновідбиваних елементів - тіл другого порядку кривизни, що забезпечують вирішення різноманітних світлотехнічних завдань. Деякі з них наведені на рис. 3.9. Два види відбивачів (рис. 3.9 в, г) утворені обертанням різних частин параболи (рис. 3.9 а, б) довкола вісі, що проходить під потрібним кутом до оптичної вісі крізь фокус, дозволяють забезпечити високу концентрацію випромінювання під заданим кутом до вісі за різних розмірів відбивачів.

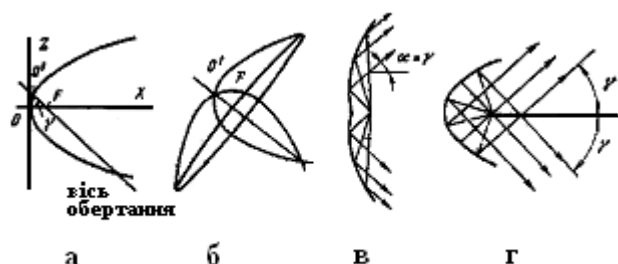


Рис. 3.9 – Варіанти дзеркальних поверхонь, утворених обертанням параболи навколо похилої вісі де а і б - константи.

Показана на рис. 3.10 б крива, відома під назвою евольвента, є розгортанням кола, що забезпечує можливість такого відбиття променів, за якого усі вони не потрапляють назад на джерело світла (обгинають його).

Поширені СП із оптичними системами, що базуються на використанні сукупності плоских дзеркал, які утворюють пластинчасті (фацетні) відбивачі. Найбільш відомі параболоїдні й параболоциліндричні пластинчасті відбивачі; в окремих випадках застосовуються пластинчасті еліпсоїдні відбивачі.

Пластинчасті параболоїдні відбивачі утворюються під час установки плоских дзеркальновідбивних пластин на параболоїдному кістяку або за дотичними до точок кістяка, або за хордами. Пластини обираються й установлюються при цьому таким чином, щоб центральний промінь світлового пучка, відбитого кожною пластиною, був спрямований паралельно оптичній вісі параболоїдного кістяка.

Одним із можливих варіантів дзеркальних поверхонь, що використовуються в оптичних системах, є гіперболоїд, одержуваний обертанням гіперболи довкола оптичної вісі (рис. 3.10, а). Рівняння гіперболи:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1, \quad (3.3)$$

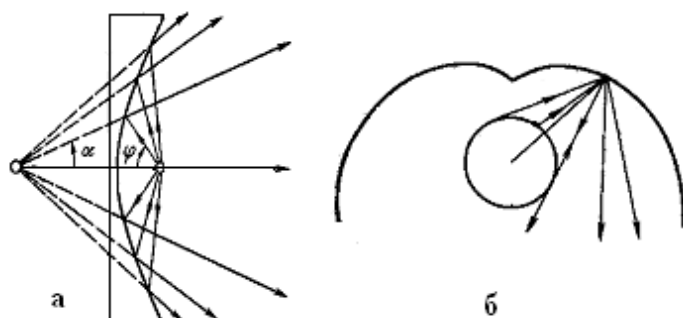


Рис 3.10 а - гіперболічна поверхня; б - евольвента поверхня



Рис. 3.11 - Пластинчастий (фацетний) відбивач прожектора заливного світла

Значне місце в оптичних системах СП посідають контрвідбивачі (К на рис. 3.12), призначені для підвищення концентрації світлового потоку (збільшення сили світла в необхідних напрямках) СП прожекторного типу за рахунок екранування прямого світла лампи, що погіршує якість освітлення. Контрвідбивачі найчастіше становлять сферичні відбивачі малого діаметра, які встановлюють в безпосередньо біля лампи з боку, протилежного основному відбивачу. Світловий потік лампи, що перехоплюється контрвідбивачем, потрапляє на основний відбивач, збільшуючи частку потоку в корисному світловому пучку й поліпшуючи рівномірність освітлення. Роль контрвідбивача може відігравати дзеркалізований купол лампи.

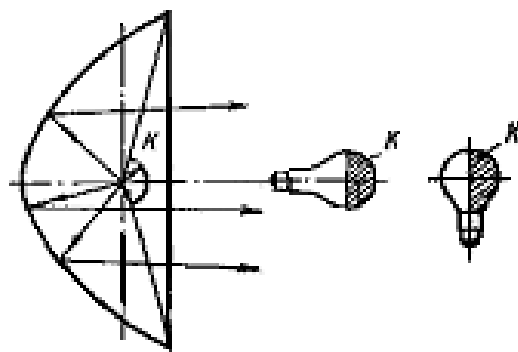


Рис. 3.12 – Різні варіанти контр відбивачів

Перехід на джерела світла на основі світлодіодів стимулював розробку нових конструкцій світлових приладів. Так у світлових приладах проекторного класу лінзову систему з ламповим джерелом світла можна замінити на світлодіодну. Тому що наразі світлового потоку одиничного (білого) світлодіода недостатньо для освітлення екрана середніх розмірів, були запропоновані конструкції проекторів на базі концентрувальних світлодіодних модулів (рис. 3.13 і рис. 3.14)

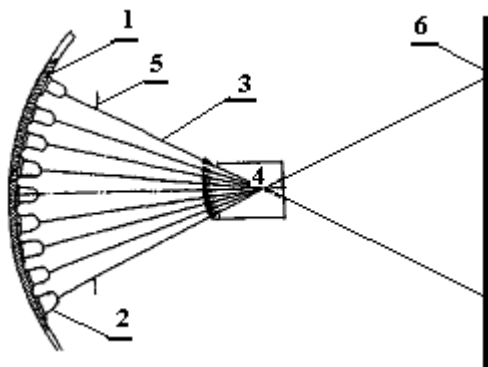


Рис. 3.13 – Сферичний світлодіодний модуль:

1 - основа модуля; 2 - світлодіод; 3 - вісьовий промінь; 4 - проекційний об'єктив; 5 - діафрагма; 6 - екран

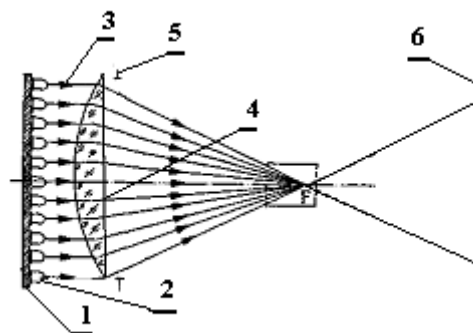


Рис. 3.14 – Проектор із плоским світлодіодним модулем: 1 - основа модуля; 2 - світлодіод; 3 - вісьовий промінь; 4 - конденсорна лінза; 5 - діафрагма; 6 - екран

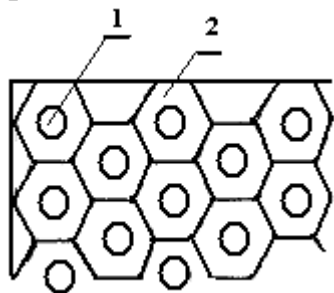


Рис. 3.15 –

Освітлювальна світлодіодна панель:

1 - світлодіод;
2 - відбивна основа освітлювальної світлодіодної панелі

Можливі й інші схеми використання світлодіодів у проекційних приладах у вигляді багатоеlementних світлодіодних модулів. Однак, під час монтажу в модулі світлодіоди залишають простір між собою, що знижує рівномірність засвічення кадрового вікна і проекційного об'єкта. Щоб уникнути цього, з метою проекції необхідно використовувати щільно упакований світлодіодний модуль із квадратним чи шестигранним контуром параболоїдного відбивача, що забезпечить досягнення повного світіння (рис. 3.15). Вони дозволяють наростити сумарний світловий потік і наблизити розробку світлодіодних проєкторів (кінопроекторів і кодоскопів) до існуючого сьогодні ламповим.

На кафедрі СДС ХНАМГ запропоновано конструкцію суматора на основі світлодіодів, який підсумовує випромінювання багатьох світлодіодів і спрямовує його уздовж однієї лінії. Розроблена конструкція ґрунтується на здатності дзеркальної замкненої еліпсоїдної поверхні відбивати будь-який промінь, що пройшов через один із фокусів еліпсоїда в напрямку, за якого він обов'язково пройде крізь другий фокус, а, відбившись удруге від еліпсоїдної поверхні, знову пройде через перший фокус і так далі, щораз притискаючись до великої вісі еліпсоїда обертання доти, доки цілком не зіллється з останньою.

Шляхом простих геометричних побудов легко переконатися, що система, що складається з еліпсоїдного дзеркала, виконаного у виді частини

еліпсоїда обертання і плоского дзеркала, встановленого в центрі еліпсоїда перпендикулярно великій вісі, працює аналогічним образом.

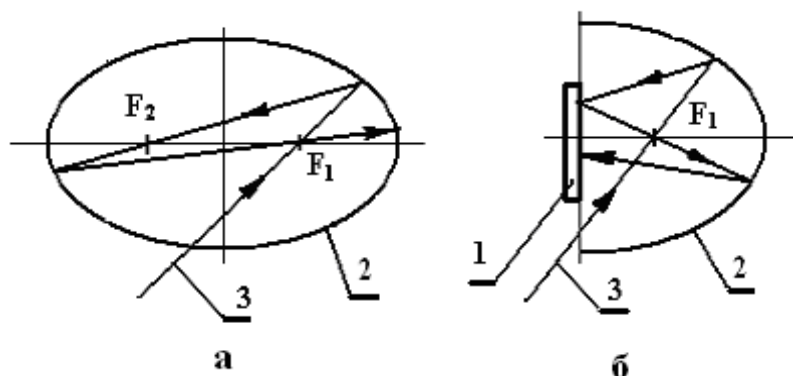


Рис. 3.16 – Хід променів в еліпсоїді й напівеліпсоїді:

1 - плоске дзеркало;
2 - еліпсне дзеркало, виконане у вигляді частини еліпсоїда обертання; 3 - промінь

джерела випромінювання; F_1 , F_2 - фокуси еліпсоїда обертання

Із метою реалізації ідеї запропонованого пристрою потрібна особлива конструкція світлодіода (див. вище), за якої випромінюючий кристал розташовується у фокусі еліпсоїда, і його випромінювання спрямоване на найближчу дзеркальну еліптичну поверхню. Така конструкція дозволила зводити випромінювання кристала в точку.

Схема пристрою наведена на рис. 3.17. Пристрій становить твердотільну систему, у якій випромінюючі світлодіоди (описані вище конструкції) розташовуються по колу відносно вісі великого еліпсоїда таким чином, щоб їхні фокуси збігалися з фокусом великого еліпсоїда. Кут щодо вісі, під яким випромінювання потрапляє у великий еліпсоїд, не відіграє принципового значення, тому світлодіоди можна розташовувати в кілька рядів по колу відносно вісі. Основна умова - збіг фокусів світлодіодів із фокусом великого еліпсоїда. У цьому випадку через певну кількість відображень (кількість відображень залежить від параметрів великого еліпсоїда, розмірів вихідного отвору й кута входження випромінювання світлодіодів відносно вісі великого еліпсоїда) випромінювання усіх світлодіодів сумується та виходить через отвір 4. Кут розбіжності сумарного випромінювання залежатиме від розмірів вихідного отвору й параметрів еліпсоїда. У конструкції можна використовувати випромінюючі кристали різної кольоровості. Керуючи включенням світлодіодів, можна одержувати на виході пристрою випромінювання різної кольоровості й інтенсивності.

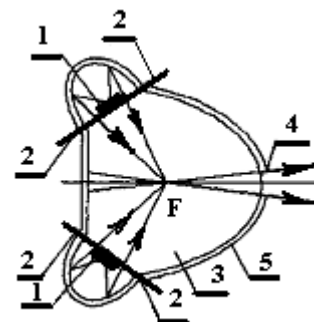


Рис. 3.17 – Конструкція джерела світла для світлових приладів:

1 - випромінюючий кристал; 2 - виводи;
3 - полімерний корпус; 4 - отвір для виведення випромінювання (не вкрита дзеркальним покриттям частина полімерного корпусу);
5 - дзеркальне покриття

Пристрій може знайти застосування в розробці сигнальних прожекторів і прожекторів для декоративного підсвічування, потужних і вузькопрямованих світлофорів (наприклад, залізничних), а акож як джерело світла під час конструювання повноколірних світлодіодних екранів, розробки зовнішнього освітлення тощо.

Відзначимо різницю у світінні дзеркальних відбивачів параболоїдної й еліпсоїдної форм. Перший, починаючи з певної відстані, залишається увесь час світлим за будь-якого віддалення від нього. Другий повністю світиться лише для невеликої ділянки вісі, розмір якої визначається певною областю, яку займає зображення.

Прожектори і проектори мають тільки оптичні пристрої. Світильники можуть мати як оптичні пристрої, так і світлорозподільні пристрої з розсіюючих матеріалів: дифузійні відбивачі й розсіювачі; матовані відбивачі й розсіювачі.

Для дзеркальних оптичних систем прожекторних і проекторних СП завжди відома необхідна залежність між напрямками променів, що падають на відбивач і відбиваються (для прожекторів усі промені, які падають на відбивач під різними кутами φ , мають здебільшого йти в одному напрямку найбільшої концентрації світлового випромінювання, яке характеризується кутом $\alpha = \text{const}$, а для проекторів різним кутам φ відповідають хоч і різні, але чітко визначені кути α променів, що сходяться в одну точку чи область на оптичній вісі). Для світильників, які створюють різноманітний світлорозподіл, залежність між кутами променів, які падають і відбиваються, що визначає форму дзеркальної поверхні відбивача спочатку невідома, і має знаходитися під час розрахунку відбивача й може бути різною залежно від необхідної КСС світильника та характеристик джерела світла. Можливі форми відбивачів для світильників наведені на рис. 3.18.

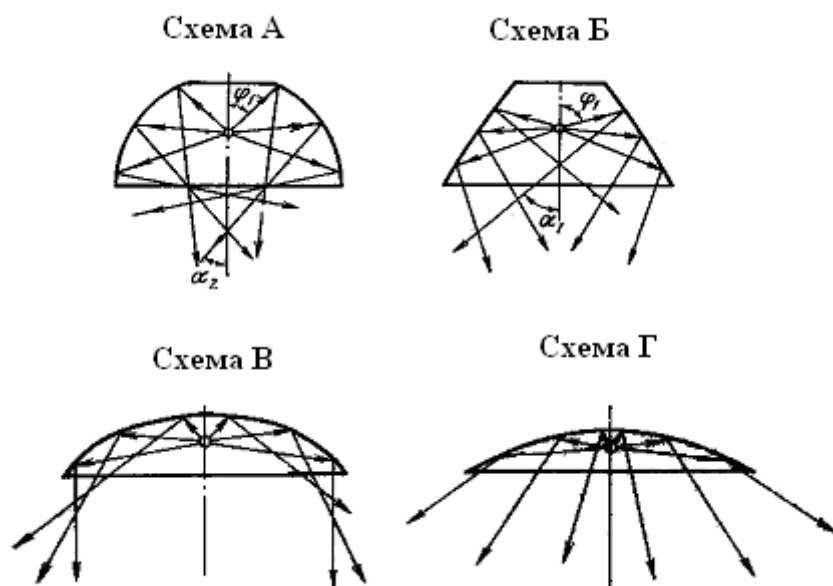


Рис. 3.18 – Принципові схеми ходу упадних і дзеркально відбитих променів, що використовуються у світильниках

Відомі чотири принципові схеми (А - Г) ходів упадних і відбитих променів для безупинних, що плавно змінюють кривизну дзеркально відбиваючих поверхонь. Для першої з них - схеми А характерне те, що всі відбиті промені перетинають оптичну вісь і один одного, при цьому упадним променям із меншими кутами φ відповідають відбиті промені також із меншими кутами α .

За схемою Б відбиті промені також перетинають оптичну вісь, однак не перетинаються самі, при цьому променям із меншими кутами φ відповідають промені з великими кутами α .

Схеми В і Г мають хід відбитих променів, аналогічний тому, який має місце, відповідно, у схемах А та Б, але за умови, що всі відбиті промені не перетинають оптичної вісі. Можна відзначити, що схема А ходів променів характерна (із розглянутих вище) для дзеркальних еліпсоїдних поверхонь, а схема Г - для дзеркальних гіперболоїдів. Під час побудови дзеркальних відбивачів світильників можуть здійснюватися сполучення поверхонь, що забезпечують різні схеми ходу упадних і відбитих променів (наприклад, на рис. 3.19 (а) наведено відбивач, який перерозподіляє випромінювання спочатку за схемою В біля верхньої своєї частини, а потім - за схемою А).

Якщо знак кривизни для всіх ділянок відбивачів однаковий, то поверхня відбивача виходить гладкою. Чергування знаків кривизни для різних ділянок (зон) профільної кривої відбивача призводить до утворення хвилястої поверхні відбивача (рис. 3.19, б).

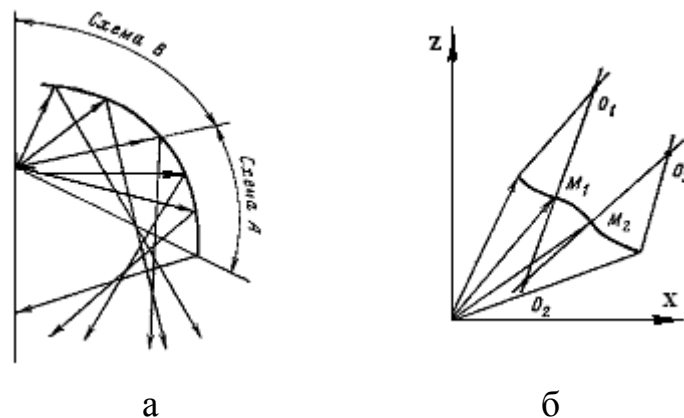


Рис. 3.19 – а – Відбивач світильника, який працює за двома схемами ходу променів; б – хвиляста профільна крива; $O_1 - O_3$ – центри кривизни; M_1, M_2 – точки сполучення

3.2. Заламлюючі оптичні системи

До основних заломлюючих системам СП належать лінзи і призми.

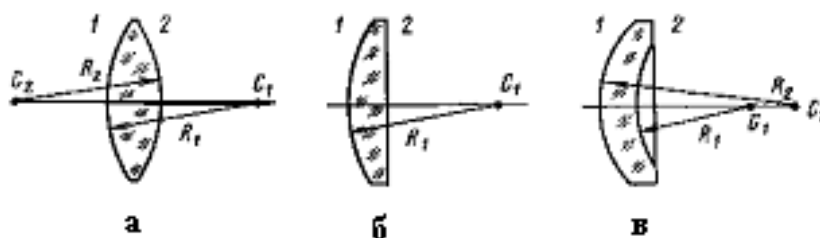
3.2.1. Лінзові елементи

Лінзою називається оптична деталь із прозорого матеріалу з показником заломлення, що відрізняється від показників заломлення навколишнього середовища, обмежена двома заломлюючими поверхнями.

Види лінз наведені на рис. 3.20.

Радіус кривизни відраховують від вершини поверхні і вважають позитивним, якщо центр кривизни розташований праворуч від вершини, і негативним, якщо - ліворуч від вершини. Лінзи утворюються внаслідок обертання профілю довкола оптичної вісі. Під час руху профілю в напрямку, перпендикулярному оптичній вісі, формуються циліндричні лінзи.

Позитивні (збираючі) лінзи



Негативні (розсіюючі) лінзи

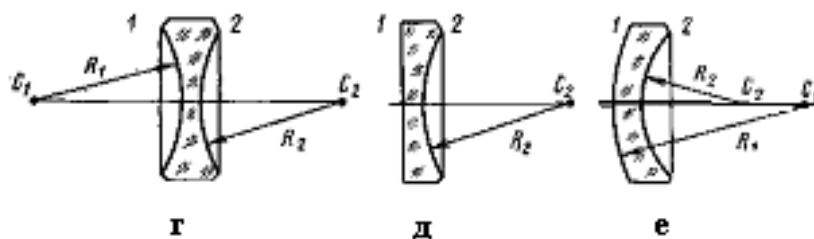


Рис. 3.20 – Види лінз: а - двоопукла; б - плоскоопукла; в - позитивний меніск; г - двовігнута; д - плосковігнута; е - негативний меніск

Основні співвідношення для лінз наступні:

$$D = \frac{1_M}{f}, \quad f = \frac{1}{D} = \frac{1}{n-1} \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1 + d \frac{n-1}{n}}, \quad (3.4)$$

де D – оптична сила;

f – фокусна відстань лінзи за однакою кривизни обох заломлюючих поверхонь;

d – товщина лінзи;

n – коефіцієнт заломлення матеріалу лінзи.

У тих випадках, коли товщиною лінзи можна зневажити ($d = 0$):

$$f = \frac{1}{n-1} \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \quad (3.5)$$

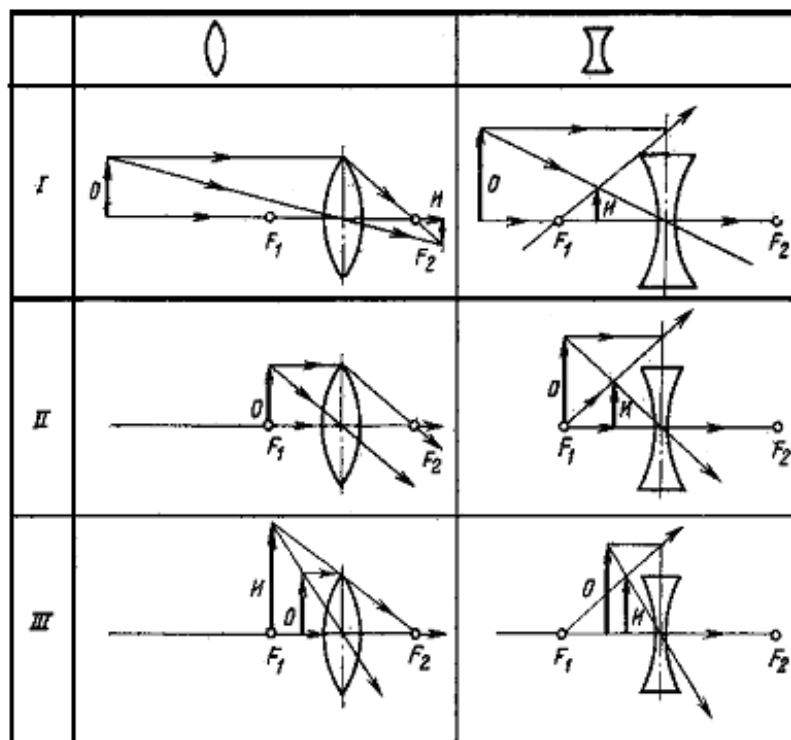


Рис. 3.22 – Побудова зображення об'єкта (тіла світного джерела)

Для позитивних лінз

I - дійсне перевернене

II - зображення

безконечності

III – мниме пряме

Для негативних лінз

Усі зображення у

мнимої прямі

При $r_1 = \infty$ чи $r_2 = \infty$

$$\text{маємо } f = \frac{r}{n-1}.$$

Для системи з двох лінз із фокусними відстанями f_1 і f_2 , розташованих на відстані l одна від одної, маємо:

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l}. \quad (3.6)$$

Як відомо, опуклі й увігнуті лінзи створюють дійсне чи мниме, пряме чи перевернене зображення об'єкта в залежно від розташування об'єкта відносно фокуса, у нашому випадку тіла випромінювання світного джерела. (рис. 3.22).

3.2.2. Призмові елементи

У світлотехніці використовуються призматичні елементи. Призмою називається оптична деталь із плоскими заломлюючими відбивними поверхнями, що утворюють між собою двогранні кути. Якщо кут між заломлюючими поверхнями складає менше 5° , то таку оптичну деталь називають клином.

Призми поділяються на заломлюючі, призначені для розкладання (дисперсії) світла, і відбивні – для зміни оптичної вісі приладу, огортання зображення та поділу пучків.

Основні види призматичних елементів, що використовуються в СП, наведені на рис. 3.23. На рисунку показаний хід променів, які вимагають заломлення при влученні під кутами, меншими за критичні (для скла $K = 8$,

$n = 1,52$,
 критичний кут
 $i = 41^\circ$,
 поліметилмета
 крилату $n = 1,49$ $i = 42^\circ$;
 полістиролу $n = 1,59$ $i = 39^\circ$),
 і більшими, що
 призводять до
 повних
 внутрішніх
 відбиттів.

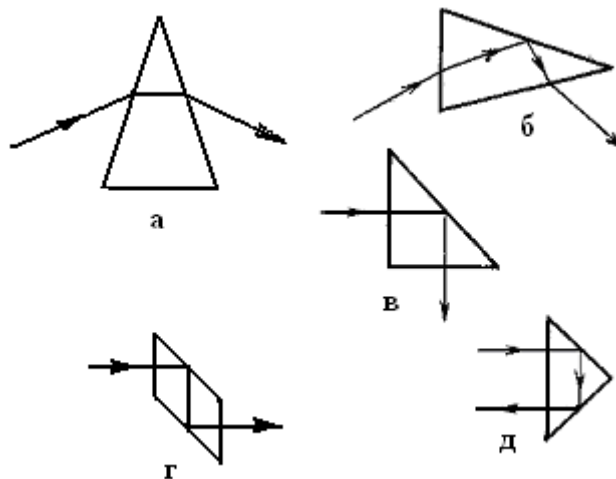


Рис. 3. 23 – Хід променів у різних призматичних елементах

3.2.3. Лінзові та призмові оптичні системи

Лінзова оптична система прожектора загалом може бути представлена позитивною лінзою, форма якої може бути різної (пласко-опукла, подвійно-опукла, опукло-увігнута). Крім того, лінзи можуть бути гладкими чи східчастими (френелівськими).

Серед прожекторних СП із заломлюючими оптичними системами широке застосування знайшли так звані лінзові прожектори з дисковими чи циліндричними лінзами. Дискові лінзи утворюються внаслідок обертання профілю пласко-опуклої лінзи (рис. 3.24, а) довкола оптичної вісі (F_z), циліндричні - при переміщенні цього ж профілю уздовж прямої, перпендикулярної оптичної вісі та профілю пласко-опуклої лінзи.

Дискові лінзи поділяються на пласко-опуклі та френелівські. Пласко-опукла лінза характеризується фокусною відстанню f , товщиною t_0 , діаметром D і найбільшим кутом $2\varphi_{\max}$ (кутом охоплення). Якщо у фокус пласко-опуклої лінзи помістити джерело світла, то його промені після заломлення будуть спрямовані уздовж оптичної вісі лінзи, забезпечуючи найбільшу концентрацію світла уздовж оптичної вісі.

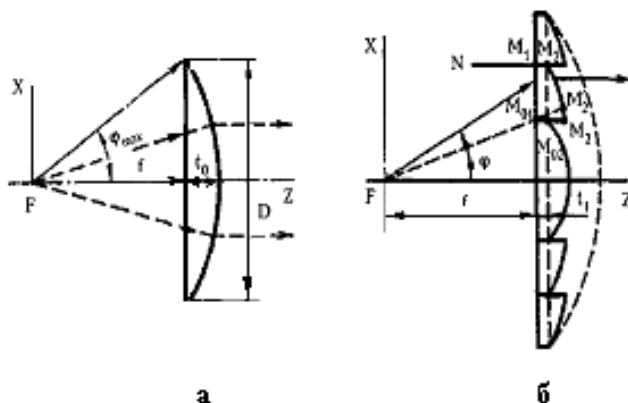


Рис. 3.24 – Профілі лінзових систем: а
 - дискової лінзи;
 б - френелівської лінзи

Ефективність дії пласко-опуклих лінз тим вища, чим більший світловий потік джерела перехоплює лінза й перерозподіляє необхідним чином. У межі бажано, щоб кут охоплення $2\varphi_{\max}$ лінзи був не меншим, ніж у дзеркального параболоїда (близько 120°). Однак, зі збільшенням кута φ_{\max} і D лінзи значно підвищуються її товщина і маса. Зростають утрати світла, і, що надзвичайно важливо, знижується точність роботи лінзи -

зростають відхилення ходу заломлених променів від оптичної вісі, й усе більш помітним стає вплив розкладання світла на спектральні складники, тобто збільшуються сферична і хроматична аберації. Зазначені відхилення стають неприпустимо великим при $2\varphi_{\max} > 300$.

Недоліки плоско-опуклих лінз успішно усуваються дисковими френелівськими (чи східчастими) лінзами, що носять ім'я їхнього винахідника, французького ученого Френеля. Френелівські лінзи забезпечують значно більший кут охоплення за малих товщин і сферичної аберації завдяки тому, що складаються з декількох елементів, розташованих симетрично зверху і знизу від центрального елемента з профілем плоско-опуклої лінзи (рис. 3.24, б). Розміри плоско-опуклої лінзи з тим же кутом охоплення, що і френелівська, позначені пунктиром на рисунку. Кожний із елементів східчастої дискової лінзи (крім центрального) має робочу грань, профіль якої відповідає частини кола з визначеним радіусом і центром кривизни, що забезпечують умову виходу паралельно оптичної вісі двох крайніх променів, що вийшли з фокуса й впали на нижню і верхню точки зверненої до джерела грані цього елемента (точки M_{01} і M_1).

Конструкція френелівських лінз має наступні відмінні риси: шар (M_1 , M_2 , M_{01} , M_{02}) однакової товщини для всіх елементів лінзи називається несучим шаром (елемента чи лінзи в цілому). Лінія $M_2 - M_2$ визначає профіль робочої грані елемента. Горизонтальні лінії $M_{01}M_2$ і M_1M_2 , що обмежують елемент, називаються сполучними гранями. За формою несучого шару френелівські лінзи поділяються на прямі та криволінійні, при цьому криволінійний несучий шар може бути відносно джерела випромінювання як зовнішнім, так і внутрішнім. Лінзи з криволінійним несучим шаром виготовляються з тією ж самою метою максимально можливого збільшення кута охоплення $2\varphi_{\max}$, від якого залежить ефективність використання лінз. Кут $2\varphi_{\max}$ для східчастих френелівських лінз зазвичай не перевищує 45° , тому що при цьому втрати на френелівське відбиття на двох поверхнях лінз складають уже 16 %. При подальшому збільшенні φ_{\max} утрати швидко стають неприйнятними (при φ_{\max} близько 60° утрати перевищують 40 %).

Застосування дискових лінз із криволінійним несучим шаром на зовнішньому боці дозволяє різко знизити сумарні втрати світлового потоку на френелівське відбиття завдяки використанню в якості заломлюючих для фокальних променів двох поверхонь замість однієї. Для збільшення кута охоплення $2\varphi_{\max}$ до 120° в оптичних системах приладів застосовують здвоєні френелівські лінзи з криволінійним несучим шаром на зовнішньому боці зовнішньої лінзи й на внутрішньому боці внутрішньої лінзи.

Френелівські лінзи мають горизонтальні сполучні грані (рис. 3.25, б). У той же час фокальний промінь, який падає на нижню точку M_{01} кожного елемента, виходить після заломлення через робочу грань у точці M_2 , що лежить помітно вище точки M_2 на горизонтальній грані. Таким чином, у кожному елементі існує неробоча трикутна ділянка $M_{01} M_2 M_2$, у яку не потрапляє жоден фокальний промінь. Цю неробочу ділянку було

запропоновано вилучити, завдяки чому маса лінзи знижується (до 7 % у низці випадків) і зменшуються утрати світлового потоку на сполучних гранях. Показана на рис. 3.25, а модифікація френелівського профілю з похилими сполучними гранями, що називається профілем Аллара, набула поширення. На рис. 3.25, в наведено вид циліндричної (бочкоподібної) лінзи Френеля.

Із метою доведення кута охоплення лінзової оптики СП до $2\varphi_{\max} = 180^\circ$ використовуються лінзи з профілем, який містить катадіоптричні елементи, що працюють на основі

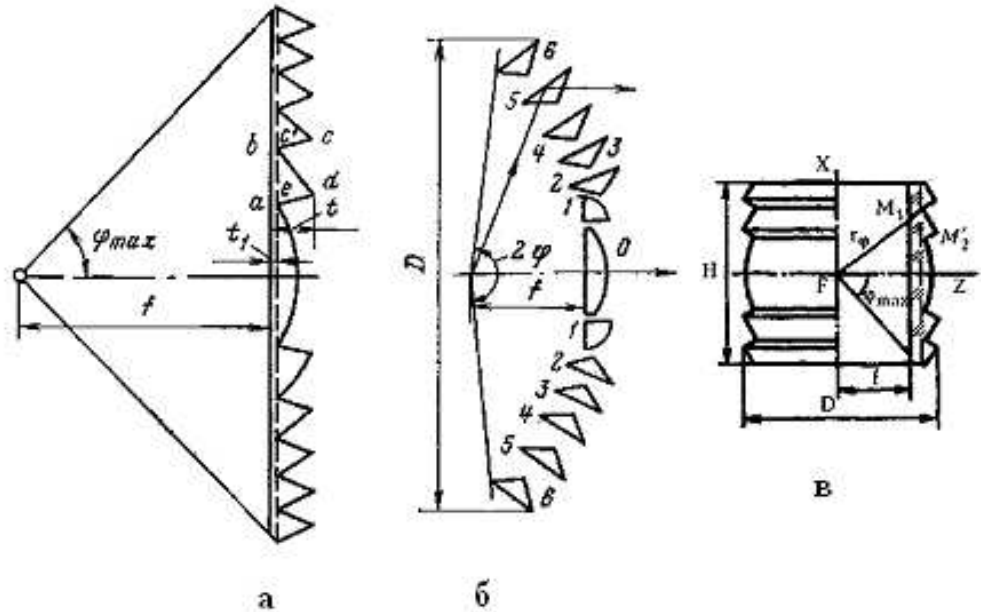


Рис. 3.25 – Лінзові оптичні системи:
а - алларовський профіль лінзи Френеля;
б - дискова лінза з катадіоптричними елементами; в - циліндрична френелівська лінза

повного внутрішнього відбиття (рис. 3.25, б) і становлять приклад комбінованих оптичних систем.

Широке використання заломлюючі оптичні системи знайшли в сучасних світильниках різного призначення. Однак, у зв'язку з тим, що світильники мають у кожному конкретному випадку забезпечувати різний необхідний світлорозподіл (при цьому далеко не завжди необхідно створювати велике значення коефіцієнтів підсилення), лінзи Френеля, які створюють концентровані конічні й веєроподібні світлові пучки, у світильниках практично не застосовуються.

Залежно від характеру КСС, типу й розташування джерела світла заломлюючі оптичні системи світильників мають багато різноманітних конструкцій. Разом із тим можна виділити кілька типових груп світлотехнічних схем заломлювачів: для вертикально розташованих ламп із концентрованим світним тілом (ЛР і ГЛВТ); для цих же типів джерел світла при горизонтальному їхньому розташуванні; для ЛЛ (рис. 3.26).

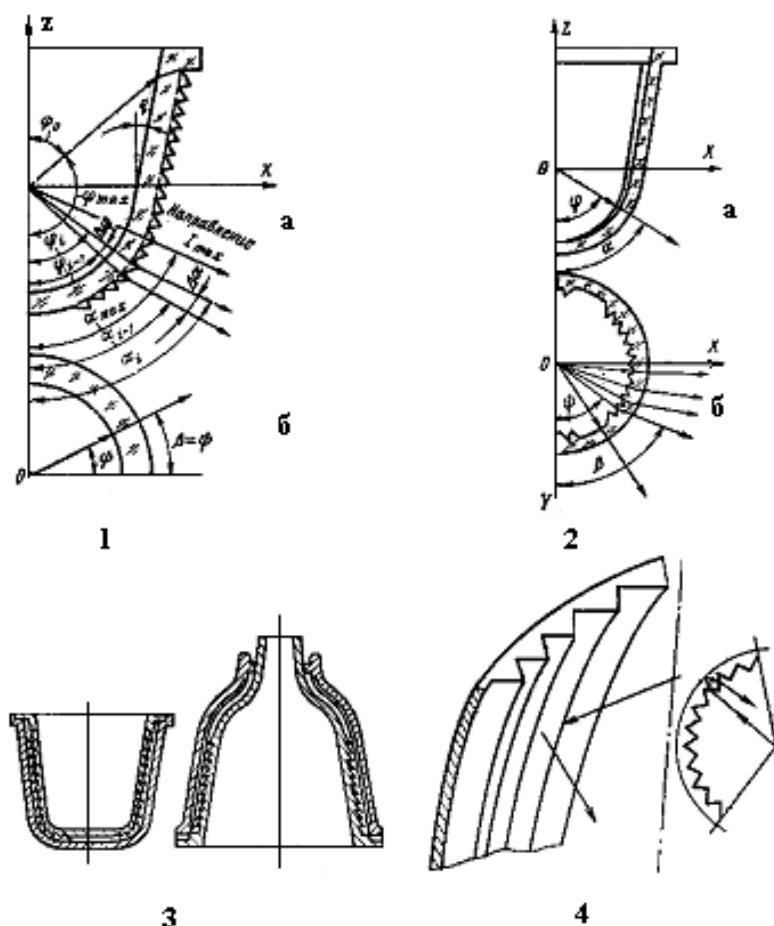


Рис. 3.26 – Заломлювачі:
 1 - круглосиметричний ;
 2 - некруглосиметричний;
 3 - здвоєний; 4 - призматичний відбивач,
 який працює на основі повного
 внутрішнього відображення

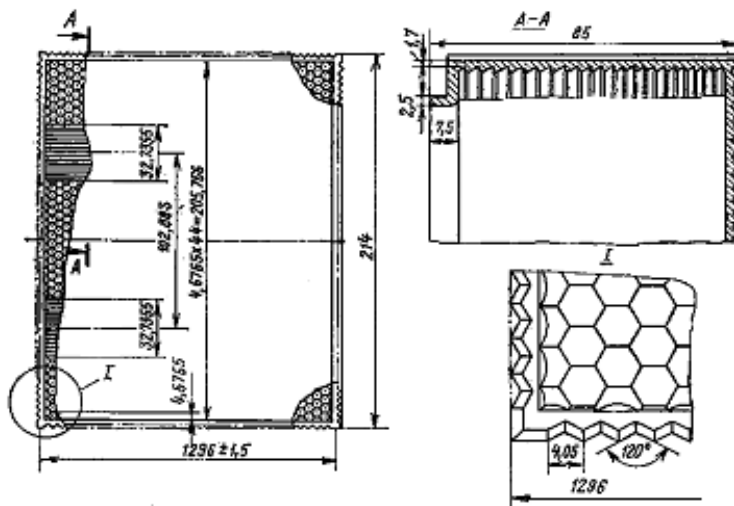
висоту джерела світла, яка дорівнює висоті циліндричної лінзи, заломлювач світильника в кожному напрямку в меридіональній площині має різні висоти зображення, що відповідають значенням необхідної в цьому напрямку сили світла світильника. Такі заломлювачі, як і циліндричні лінзи, не перерозподіляють випромінювання джерела світла в екваторіальних площинах. Розмір зображення (ширина) визначається тільки розміром джерела і при переході від одного напрямку в екваторіальній площині до іншого зображення світного тіла зміщується по поверхні заломлювача на той же кут, залишаючись незмінним за розміром.

Несиметричні заломлювачі цієї групи (рис. 3.26, 2) мають вертикально розташовані призми, що перерозподіляють світловий потік джерела в екваторіальній площині (не змінюючи його розподілу в меридіональних площинах). Ширина зображення тіла світного джерела не залишається постійною для різних напрямків в екваторіальній площині й може бути в

Типовий
 круглосиметричний
 заломлювач
 промислових і вуличних
 світильників із
 вертикально
 розташованими ЛР чи
 ГЛВТ показаний на
 рис 3.26, 1.

Круглосиметричний
 світлорозподіл із
 необхідної КСС у
 меридіональних
 площинах
 забезпечується такими
 заломлювачами за
 допомогою
 горизонтальних
 кільцевих призм на
 поверхні скляного
 ковпака, дія яких
 аналогічна дії
 розглянутих вище
 циліндричних лінз
 Френеля. Однак, на
 відміну від останніх, які
 концентрують пучок в
 одному напрямку
 зображення, що мають

Оптично найбільш точні й за світлотехнічною схемою найбільш складні суцільновилиті великогабаритні замкнені заломлювачі світильників із однією, двома й чотирма ЛЛ мають наступні основні особливості (рис. 3.27). На бічних вертикальних стінках (боковинах і торцевинах) із внутрішньої боку наявні поздовжні призми змінного за висотою (чи однакового) профілю. На зовнішньому боці цих стінок заломлювача нанесені по всій довжині вертикальні призми однакового профілю.



Подібні заломлювачі низки світильників не мають зазначених вертикальних призм, і зовнішня поверхня стінок у них гладка. Горизонтальна нижня частина заломлювача (його дно) має на зовнішньому боці поздовжні призми змінного чи однакового профілю, розташовані суворо під ЛЛ, і однорідні заломлюючі елементи по всій поверхні горизонтальної частини заломлювача.

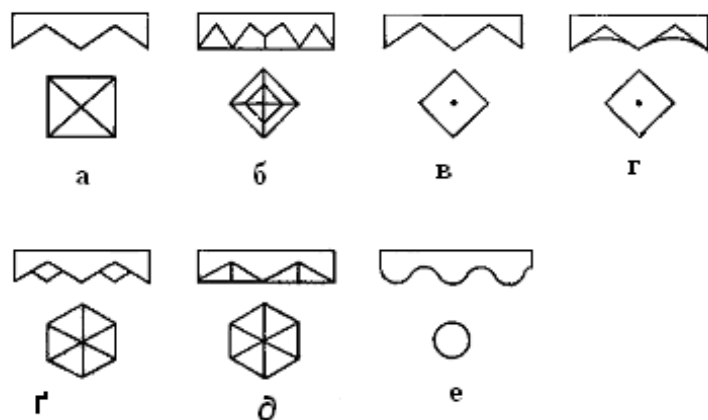


Рис 3.28 – Розповсюджені форми заломлюючих елементів оприземлених панелей:

а - чотиригранна опукла піраміда;
 б - чотиригранна увігнута піраміда з виступаючою пірамідою меншої висоти в центрі; в - опуклий конус, в основі - квадрат; г - увігнутий конус, в основі - квадрат; ґ - шестигранні опуклі піраміди; д - шестигранні увігнуті піраміди; е - напівсферичні опуклі елементи

найбільш розповсюджених листових призматичних панелей складають 2,8, 3,18, 4,75 і 5,1 мм. Пропуск кращих зразків призматичних панелей характеризується $\tau = 0,69 \div 0,86$, низка типів застосовуваних панелей мають $\tau = 0,39 \div 0,6$.

3.2.4. Комбіновані оптичні системи

Комбіновані оптичні системи містять оптичні елементи що відбивають і заломлюють системи, а також елементи, у яких поряд із заломленням випромінювання використовується ефект його повного внутрішнього відображення. Типовим прикладом комбінованих систем можуть бути лампи-фари (рис. 3.29, а, б, в, г).

Із метою різкого зниження сліпучого дії зустрічних машин на вулицях і дорогах, створюються не тільки дзеркально-призматичні лампи-фари зі складною та різною геометрією призм, але і спеціальні оптичні системи, які перерозподіляють у просторі структуру світлового випромінювання.

Однорідні заломлюючі елементи, що наносяться на зовнішню горизонтальну поверхню розглянутих заломлювачів, а також більшість інших призматичних розсіювачів незамкнутого профілю і листових панелей, можна поділити на елементи із увігнутою й опуклою поверхнями, при цьому за формою заломлюючих елементів можна виділити п'ять найпоширеніших видів: із конічною чи пірамідальною поверхнями і квадратом чи шестикутником на підставці, а також сферичні заломлюючі елементи (рис. 3.28). При цьому розміри елементів в основі змінюються для різних заломлювачів від 3,0 до 9,4 мм, а кут нахилу заломлюючої грані - від 22 до 45°. Товщини

Рис. 3.29 – Оптичні системи автомобільних фар: а - металево-скляна напіврозбірна (1950 р.);

б - металево-скляна склеєна (1968 р.);

в - суцільноскляна (лампа-фара); г - збірна фара типу ФГ-140 для легкових автомобілів ВАЗ.

1 - оптичний елемент;

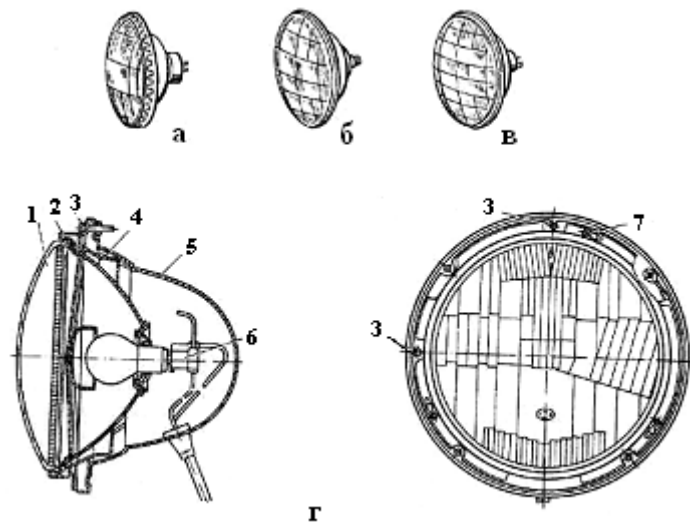
2 - декоративний обідок;

3 - регулювальні гвинти;

4 - опорне кільце; 5 - корпус

фари; 6 - з'єднувач; 7 - гвинти

кріплення оптичного елемента



Так, на рис. 3.30, а висвітлено принцип пристрою фари поляризованого світла. Шаруватий поляризатор 4 (на його підкладку позмінно нанесені шари фториду магнію і діоксиду титану відповідно до низьких коефіцієнтів заломлення) поміщений між двома східчастими скляними тілами 2 і 3 для того, щоб світло входило в них і виходило без заломлення. Поляризатор 4 розташований під кутом Брюстера до оптичної вісі відбивача, що пройшов крізь світло, стає лінійно поляризованим у площині падіння (зображено на рис. 3.30, а стрілками). Відбите від поляризатора світло, поляризоване перпендикулярно площини падіння, також використовується за допомогою дзеркала 1, що не змінює площини поляризації (виділена крапкою). Обидва поляризованих рівнобіжних пучка пропускають крізь пластинки $\lambda/2$ "у напівхвилі", що за відповідного розташування повертають їхні площини поляризації на 45° . Із метою підвищення ступеня поляризації використовується дихроїчна плівка 5.

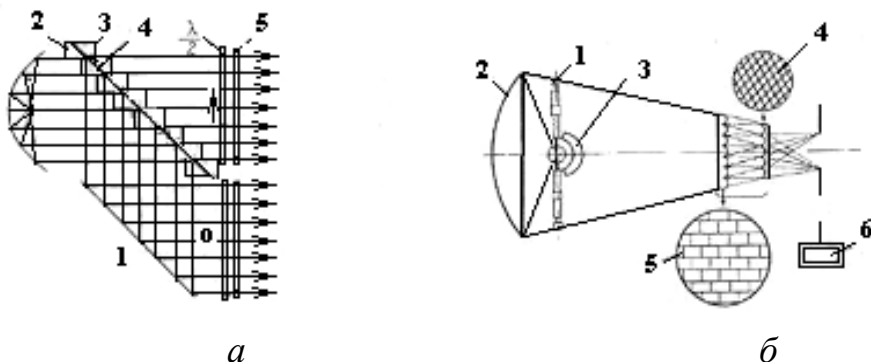


Рис. 3.30 – а - Фари поляризованого світла;

б - кінопроектор фірми «Фільмотехніка» (ВНР): 1 - ксенонова лампа; 2 - еліпсоїдний інтерференційний відбивач; 3 - дзеркальний контрвідбивач; 4 і 5 - призматичні растрові пластини; 6 - кадрове вікно

Завдяки застосуванню поляроїда-аналізатора на лобових стеклах автомобілів при їхньому зустрічному роз'їзді площини поляризації розсіювачів фар одного і лобового скла другого автомобілів будуть взаємоперпендикулярними. Пряме світло фар не пропускатиметься лобовим склом (тому що поляроїд пропускає лише складники поперечних коливань, рівнобіжних його площинам поляризації), й осліплення водія буде виключене.

У разі необхідності створення високоякісного освітлення з високою концентрацією світлового потоку на обмеженому обсязі чи малій поверхні недостатньо застосувати систему з еліпсоїдним дзеркальним відбивачем, що забезпечує необхідну концентрацію, тому що одержати високу рівномірність світлової плями при цьому не вдається. Для вирішення таких завдань у кінопроекторах використовуються дзеркально-призматичні комбіновані оптичні системи, одна з яких зображена на рис. 3.30, б, а для концентраторів, які імітують Сонце, - схеми оптичної системи наведені на рис. 3.31, а, б.

Кожна з лінз растрової пластини 5 (рис. 3.30, б) збирає світловий потік на визначеній лінзі растра 4, при чому ця лінза, у свою чергу, зображує лінзу растра 5 на кадровому вікні 6. Завдяки цьому забезпечується не тільки висока рівномірність освітленості проектного кадру, але і значне збільшення корисного світлового потоку кінопроектора.

Оптичний інтегратор, який установлюється у другому фокусі еліпсоїдного відбивача (рис. 3.31, а), дозволяє створити світловий пучок визначеного кутового розміру з однорідним симетричним світлорозподілом, незначним спадом сили світла від вісі до периферії. Інтегратор складається з однакових за формою та розмірами установлених упритул скляних стрижнів, що працюють подібно до проектора: вхідна сферична поверхня (лінза) концентрує випромінювання на вихідній, а остання створює зображення вхідної поверхні на віддаленій. Принцип дії оптичного інтегратора полягає в подрібненні оптичними елементами упадного нерівномірного потоку випромінювання на елементарні світлові пучки з наступним їхнім накладанням на освітлюваній поверхні. Вирівнюючі властивості оптичного інтегратора тим вищі, чим більша кількість його оптичних елементів; зняття крайового ефекту забезпечується додатковою лінією (рис. 3.31, б).

Подальше збільшення ефективності ускладнених оптичних систем

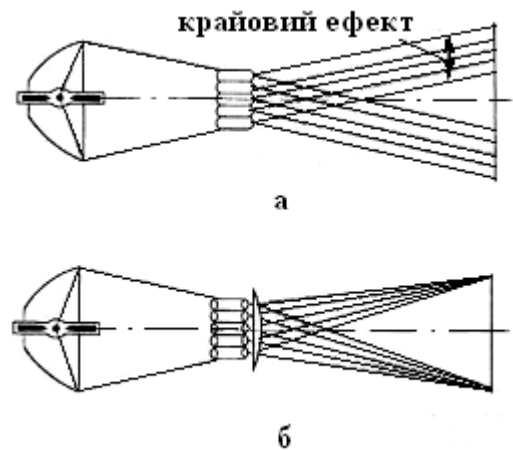


Рис. 3.31 – Схема концентратора з оптичним інтегратором зі скляних стрижневих оптичних елементів зі сферичними торцями (а) чи з дволінзових оптичних елементів для усунення крайового ефекту (б)

пов'язане з необхідністю підвищення ККД системи за рахунок збільшення кутів охоплення. В оптичній системі з еліпсоїдними відбивачами надзвичайно важливо при цьому, щоб світлові промені, які падають на другу фокальну площину під великими кутами, що перевищують апертурний кут проєкційного об'єктива, були спрямовані крізь кадрове вікно у вхідну зіницю об'єктива. Це можливо лише в тому випадку, якщо між зміщеним назовні від другої фокальної площини кадровим вікном і відбивачем розташувати так званий узгоджуючий (із апертурою об'єктива) дзеркальний відбивач або торцевий світловод (рис. 3.32).

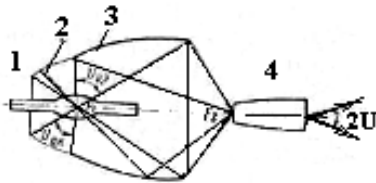


Рис. 3.32 – Оптична система з еліптичними складниками відбивачем й узгоджуючим світловодом: 1 - ГРЛ; 2 - додатковий відбивач; 3 - відбивач; 4 - світловод; $U_{0до}$, $U_{0э}$ - кути охоплення відбивачів; $2U$ - кут розсіювання вихідного пучка

До комбінованої можна зарахувати й оптичну систему щілинних світловодів. Щілинний світловід (рис. 3.33 і 3.34) відрізняється від торцевого тим, що випромінювання вводиться в його торець, а виходить крізь оптичну щілину.

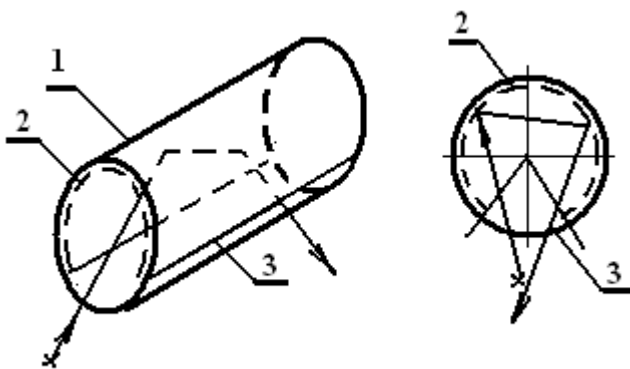


Рис. 3.33 – Принципова схема дії щілинного світловода

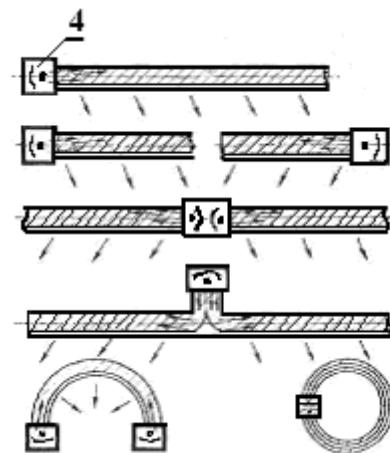


Рис. 3.34 – Варіанти світлотехнічних схем освітлювальних пристроїв із щілинними світловодами з різним розташуванням увідних оптичних систем

Щілинний світловід становить порожню циліндричну (чи іншої форми, наприклад, еліптичну) трубу, велику порівняно з діаметром довжини, частина внутрішньої поверхні якої по всій довжині укрита дзеркальновідбиваючим шаром 2, при цьому випромінювання вводиться за допомогою спеціальних водяних оптичних систем 4 у торець (чи в обидва торці) світловоду, а виходить із труби по всій довжині крізь некриту відбиваючим шаром поверхню 3 - світлопропускаючу оптичну щілину. У процесі поширення випромінювання в щілинному світловоді воно переломлюється на вході крізь

торець і виході крізь оптичну щілину, а також багато разів відображається в каналі світловоду.

Існують різні варіанти взаєморозташування увідних пристроїв і щілинних світловодів, використання криволінійних (до тороїдальних) щілинних світловодів, деякі з яких зображені на рис. 4.33. Канали щілинних світловодів можуть бути твердими й еластичними та виготовлятися з екструдированої пластмаси, тонкої поліетилентерефталатної чи іншої плівки, у тому числі дзеркалізованим методом металізації у вакуумі.

3.2.5. Освітлювальні прилади з гнучкими волоконними світловодами

Гнучкі волоконні світловоди (ГВС) становлять пучок (жилу) гнучких волокон, які складаються із серцевини (з показником заломлення n_1), укритої оболонкою (показник заломлення якої $n_2 < n_1$). Під час проходження таким волокном світлові промені, кут падіння яких менший за критичний, піддаються повному внутрішньому відображенню. Багаторазово відбиваючись від оболонки, світло поширюється лише серцевиною волокна (рис. 3.35). Сучасні ГВС різняться за конструкцією, матеріалами й кількістю світловідних волокон.

Волоконні світловоди з надзвичайно тонкими волокнами (діаметром від 50 до 150 мкм) із кришталевого (свинцевого) скла використовуються в акцентуючому декоративному та місцевому освітленні. Більш дешеві світловоди з волокнами діаметром 1 мм, витягнутими з поліметилметакрилату (ПММА), використовують в освітлювальних і світло рекламних установках, а також у різних медичних (ендоскопах) та інших приладах для освітлення важкодоступних місць. Вони мають пропуск 30 – 70 % на 1 м довжини та допускають вигин за радіусом більше 25 мм.

Пізніші розробки моноволоконних світловодів із одним гнучким стрижнем великого діаметра (15 - 20 мм), витягнутим із прозорого еластичного матеріалу (наприклад, на основі кремнійорганічної смоли), відрізняються не лише великим пропуском світла, але й більшим значенням мінімально допустимого радіуса вигину, ніж світловодів із безліччю тонких пластмасових волокон.

Освітлювальні установки з гнучкими волоконними світловодами складаються з трьох основних компонентів (рис. 3.36): власне світловід, увідний пристрій (УП) чи оптичний порт й оптичні насадки («світильники»),

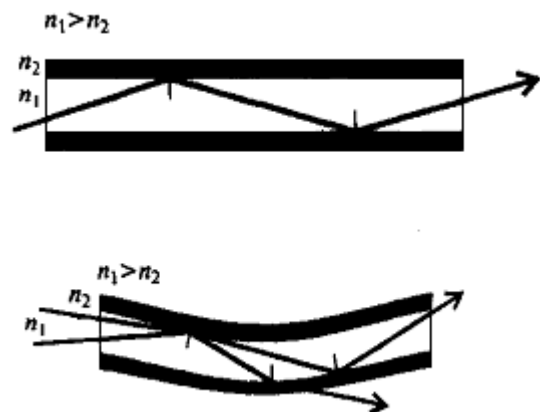


Рис. 3.35 – Гнучкий волоконний світловід із коефіцієнтами заломлення: n_1 - серцевини; n_2 - оболонки.

до яких під'єднується вихідний кінець кожного одножильного світловоду.

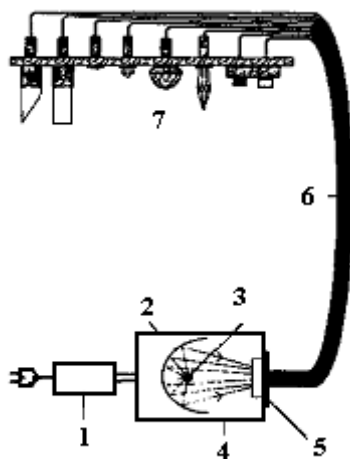


Рис. 3.36 – Схема освітлювального пристрою із гнучкими волоконними світловодами: 1 - трансформатор чи ПРА; 2 - відбивач; 3 - джерело світла; 4 - увідний пристрій; 5 - вихідний отвір для пучка світловодів; 6 - пучок гнучких світловодів; 7 - оптичні насадки (світильники), - і вигляд такого пристрою з різними насадками

Світловоди укладаються в захисну трубку з непросвічувальної пластмаси. Спеціальні УП, що містять ДС, відбивач, світлофільтри та деякі інші

оптичні елементи, концентрують світловий потік на вхідному кінці світловоду, який кріпиться до корпусу УП. Вихідний кінець світловоду приєднується до оптичної насадки, яка перерозподіляє світловий потік у просторі або скеровує цей потік на освітлюваний об'єкт.

Необхідність індивідуального УП робить одножильні світловоди відносно громіздкими та дорогими, що обмежує сфери їхнього застосування (переважно медичні та деякі інші прилади, які не мають потреби у використанні одночасно декількох світловодів). Тому в останні роки поширення набули багатожильні світловоди. Увідні торці складників їхніх одножильних світловодів щільно зібрані в один загальний вузол, який приєднується до корпусу УП. Одразу за загальним вступним торцем багатожильний світловід розділяється на безліч (від одиниць до сотень штук) одножильних світловодів, що можуть мати різні діаметри й довжину; кожний із них приєднується вихідним торцем до призначеної для нього оптичної насадки.

Багатожильний світловід складається із шістьох окремих жил із загальним увідним торцем. Кожна жила містить 50 світлопровідних волокон діаметром 1 мм із ПММА й укладається в захисну трубку з чорного полівінілхлориду, що має зовнішній діаметр 8 мм і мінімальний радіус вигину 25 мм. Стандартна довжина жил (одножильних світловодів) - 2 м. Увідний торець світловоду, що поєднує 300 волокон шести жил, укомплектований різьбовою гільзою для приєднання до корпусу УП. Маса світловоду 1 кг.

В інших випадках світлопровідні жили одножильних світловодів, які використовують для комплектування багатожильних світловодів, складаються з найтонших волокон кришталевого скла. Зовнішні діаметри всіх багатожильних світловодів лежать у межах 22 мм, що дозволяє використовувати їх із таким самим УП і приєднувальним до нього вузлом. Завдяки високій якості скла, із якого виготовлені світлопровідні волокна, ці світловоди витримують вплив агресивного середовища, можуть працювати у зануреному стані й температурному діапазоні від мінус 15° С до + 100 ° С.

Світловоди бувають двох типів: торцевого й бічного світіння.

Оптоволоконні кабелі торцевого світіння працюють за класичною схемою передачі світла в задану точку простору з мінімальними втратами (рис. 3.35, а). Принцип дії кабелів бічного світіння, навпаки, заснований на «побічному ефекті» світіння оптоволокна, що виникає через утрати під час внутрішнього відображення, коли частина світла проходить назовні (це відбувається при вигині волокна, коли кут падіння променів менший за граничний, і фактично внутрішнє відображення стає не повним, а частковими, рис. 3.35, б). У світловодах бічного світіння використовуються такі ж волокна, як і в кабелях торцевого світіння, тільки вони особливим чином скручені або переплетені. При цьому застосовується прозора гнучка оболонка, і світло стає добре видимим, створюючи бічне світіння уздовж світловоду.

3.2.5.1. Увідні освітлювальні прилади

Із метою введення світлового випромінювання у світловід використовуються спеціальні увідні пристрої (УП) (рис. 3.36, 4), що містять у металевому корпусі ДС, відбивач і різні світлофільтри (у т. ч., що затримують ІЧ і УФ складники випромінювання ДС), а також перехідний інтерфейс. Для підвищення декоративного ефекту, створюваного ОУ з волоконними світловодами, УП може оснащуватися стаціонарними й обертовими кольоровими світлофільтрами.

Існує широка номенклатура ввідних приладів з наступними параметрами:

- із ГЛР 12 В потужністю 50 Вт, що відрізняються характеристиками інтерференційних відбивачів, із якими вони працюють (габаритні розміри корпусу (10x84x152 мм), і можливістю встановлення кольорових світлофільтрів;
- із ГЛР 12 В потужністю 100 Вт, із інтерференційним відбивачем, із термореле й вентилятором (160x128x255 мм);
- із ГЛР 12 В, потужністю 100 Вт, інтерференційним відбивачем, зі змінними очесними світлофільтрами та вентилятором, що різняться наявністю або відсутністю реле часу (160 x 128 x225 мм);
- із МГЛ типу HQ1-T потужністю 150 Вт, інтерференційним відбивачем, із вентилятором, термореле й виносним ПРА (205x160x298 мм).

3.2.5.2. Оптичні насадки

Щоб перерозподілити у просторі потік, що виходить зі світловода, використовують оптичні насадки (рис. 3.36, 7), подібні до мініатюрних світильників різних типів. Ці насадки виготовляються (за винятком монтажних деталей) із оптичного чи кришталевого скла чи прозорії безбарвної пластмаси (переважно ПММА). Залежно від визначеного світлотехнічного завдання насадки вбудовуються або напіввбудовуються в підвісні стелі, перегородки, у стінки меблів, музейних стелажів і торгового устаткування.

Оптичні насадки бувають нерухомими, поворотними, кутовими

(«кососвіти»), з регульованим за шириною світловим пучком, а також суто декоративними. Деякі з них - із лінзою Френеля, інші - мають більш складну оптичну систему й дозволяють звужувати і розширювати світловий пучок. Поворотні насадки дають можливість змінювати напрямок світлового пучка. Існують також варіанти з виходом випромінювання убік відносно вісі самої насадки.

Крім освітлювальних і світлореklamних установок, ГВС широко застосовуються в різних декоративних світильниках і сувенірах, а також для освітлення швейних машин, мікроскопів, контрольно-вимірювальних, медичних і деяких інших приладів.

Основні переваги СП із ГВС:

1. Істотне розширення можливостей проектування й монтажу установок внутрішнього та зовнішнього освітлення, зокрема, установок архітектурного освітлення із дискретним розташуванням безлічі світних елементів (наприклад, «зоряне небо»), тому що виключається твердий зв'язок між місцем розташування ДС (вступного пристрою) і оптичними насадками, крізь які це випромінювання скеровується на освітлювані об'єкти.

2. Забезпечення необхідного світлорозподілу за допомогою компактних і недорогих насадок замість більш громіздких і матеріалоємних світильників.

3. Повна пожежо- та електробезпечність насадок, тому що до них не підводиться електроживлення.

4. Виключення нагрівання, знебарвлення й інших видів ушкоджень експонатів, зразків товарів та інших освітлюваних об'єктів, чутливих до ІЧ і УФ променів, зокрема, завдяки застосуванню відповідних світлофільтрів у УП.

5. Значна економія матеріальних і трудових ресурсів за рахунок економії дротів і міді, малої матеріалоємності виготовлення оптичних насадок.

6. Можливість розробки легких і гнучких насадок для переносних ліхтарів, що дозволяють проводити ремонт устаткування у важкодоступних місцях.

7. Можливість улаштування динамічного та кольорового освітлення.

Перспективними галузями застосування ГВС є такі:

- безпечне і приховане освітлення вітрин у музеях, на виставках і в магазинах, у тому числі зовнішніх вітрин магазинів;
- індивідуальне освітлення пасажирських місць (для читання) у салонах будь-яких громадських засобів транспорту;
- безпечні ялинкові гірлянди;
- акцентувальне освітлення без шиноводів і спеціальних світильників;
- безлампові декоративні світильники, люстри, канделябри;
- важкодоступні для обслуговування приміщення, наприклад, закриті плавальні басейни;
- пристрої для групового місцевого освітлення промислових швейних машин, збирання дрібних і точних виробів;

- зовнішнє декоративне контурне освітлення світловодами довжиною від 10 до 15 м;
- підводне освітлення фонтанів і відкритих басейнів;
- світлове оформлення зовнішніх рекламних щитів.

3.3. Дифузійні відбивачі, екранувальні ґрати, кільця

Оптичні системи світильників, які перерозподіляють світловий потік джерел без значної концентрації, можна поділити на дифузійні, спрямовано-розсіювальні та декоративні системи (кришталеві грановані заломлювальні елементи і диспергуюче світло). Розсіювачі СП, що перерозподіляють випромінювання на основі законів розсіяного і спрямовано-розсіяного пропускання світла, класифікуються на дифузійні, матові та матовані розсіювачі. Матові й матовані розсіювачі пропускають світло розсіяно, однак, у перших із них розсіювання випромінювання відбувається в об'ємі матеріалу, а у других - на поверхні матеріалу.

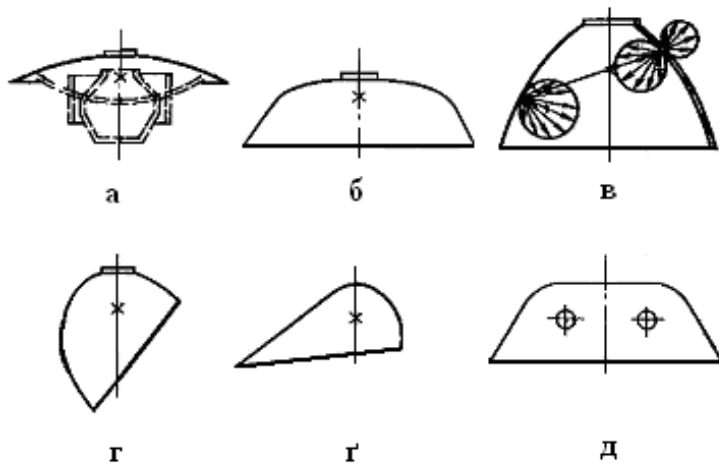


Рис. 3.37 – Види дифузійних відбивачів світильників

наведені на рис. 3.38, а світильників із ЛР і ГЛВТ - на рис. 3.39. Зображені на рисунках частини світильників можуть одночасно виконувати функції як відбивачів, так і проникальних для світла елементів. Наприклад, відбивачі, виготовлені з поліметилметакрилату, можуть одночасно бути розсіювачами та віддзеркалювати світло (рис. 3.37, в). Екранувальні ґрати зроблені зі світлорозсіювального полістиролу, світяться в обсязі, а зроблені з прозорого полістиролу, з наданою спеціальною ламаною формою – створюють вигляд оживляючої гри світла світильників.

Відбивачі з рис. 3.37, а не створюють захисного кута й застосовуються або як відбивачі-піддашники для захисту від упадної води у світильниках зовнішнього і промислового освітлення за наявності розсіювачів чи заломлювачів, або як відбивачі, які використовуються з розсіювачами та кольоровими прозорими стеклами в різноманітних світильниках для житлових і громадських будинків.

Дифузійні та світльники, спрямовано-розсіювальні, мають однакові принципові схеми й відрізняються оптичними характеристиками застосовуваних матеріалів. Усі відбивачі світильників цих груп умовно можна звести до видів, зображених на рис. 3.37, типові екранувальні ґрати для світильників із ЛЛ

Відбивачі з малим (рис. 3.37, б) і великим (рис. 3.37, в) захисними кутами поширені в промислових світильниках типів «Універсаль» і «Глибоковипромінювач». Сталеву поверхню таких відбивачів укривають силікатною емаллю гарячого випалу (зі змішаним відбиттям) чи білими титановими емалями (із дифузійним відбиттям). Під час використання алюмінієвих відбивачів у «глибовипромінювальних» світильниках поверхня перших обробляється електрохімічним чи термохімічним об'яченням, що надає поверхні відбивачів спрямовано-розсіяного відбиття. Якщо відбивачі з рис. 3.37, а - в круглосиметричні, то відбивачі з рис. 3.37, г - і на цьому ж рисунку мають лише одну (рис. 3.37, г і г) чи дві (рис. 3.37, д) площини симетрії.

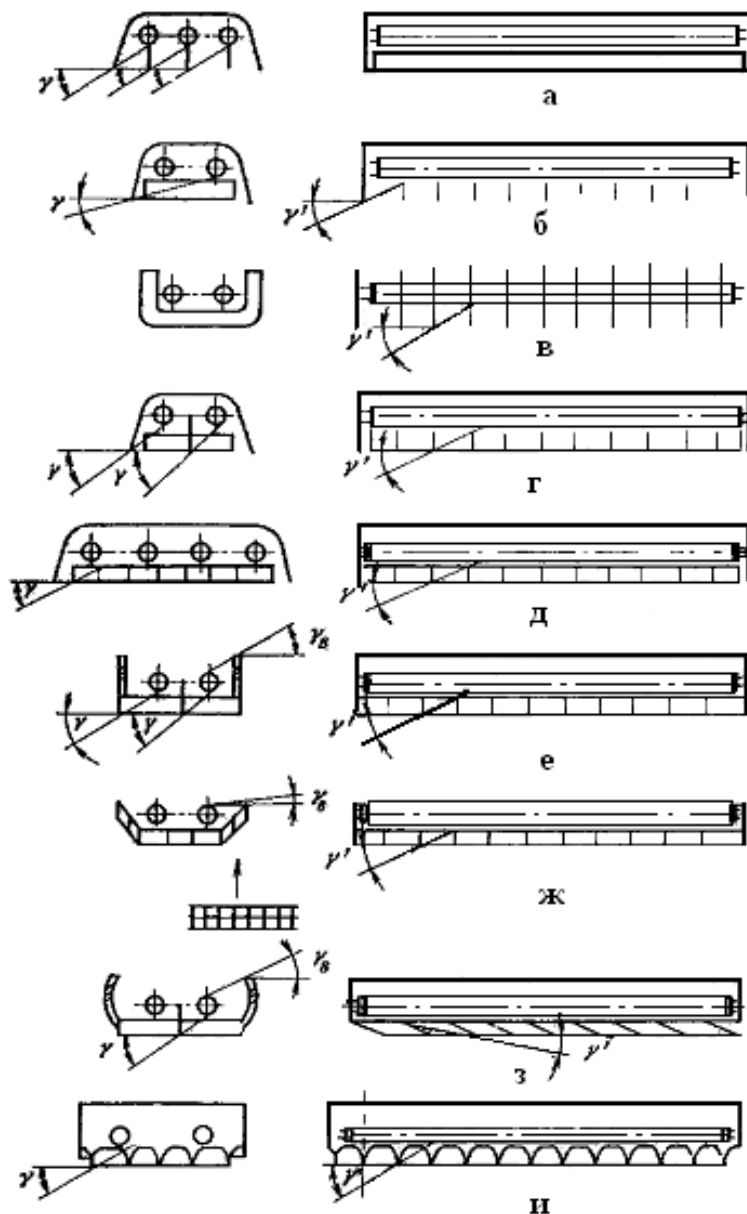


Рис. 3.38 – Варіанти світлотехнічних схем світильників із ЛЛ та екранувальними ґратами

Світильники з дифузійними відбивачами рис. (3.37, г і г) забезпечують несиметричний у площині креслення світлорозподіл; перший із них - так званий світильник «Кососвітло», другий - зазвичай світильник місцевого освітлення.

Відбивач із рис. 3.38, д належить до світильників із ЛЛ, і здебільшого покривається білими мочевиноформальдегідними емалями з характеристиками змішаного відбиття, близькими до дифузійних, чи силікатними емалями гарячого випалу. Виготовляються також відбивачі і зі світлорозсіювальної пластмаси (рис. 3.37, в, д).

Під екранувальними ґратами розуміють елементи оптичної системи світильників, що складаються з непрозорих чи світлопропускательних екранів, розташованих у певному порядку у просторі, які спільно діючи створюють захисний чи умовний захисний кут (рис.3.39).

Побудова системи кільцевих екранів у світильниках, зображених на рис. 3.40, має забезпечити повне перекриття нитки розжарювання ламп у межах захисних кутів і виключити видимість яскравого відблиску, створюваного відображенням тіла розжарення від горла колби лампи. Поряд із цим кільця беруть участь у перерозподілі світлового потоку лампи разом із іншими елементами дифузійної оптичної системи кільцевих світильників (або відбивачем, або верхнім чи нижнім екраном різної форми). Виготовляються кільцеві світильники литими зі світлорозсіювальної

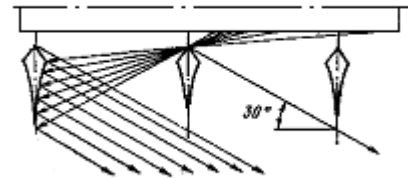


Рис. 3.39 – Дзеркальні параболічні екранувальні ґрати

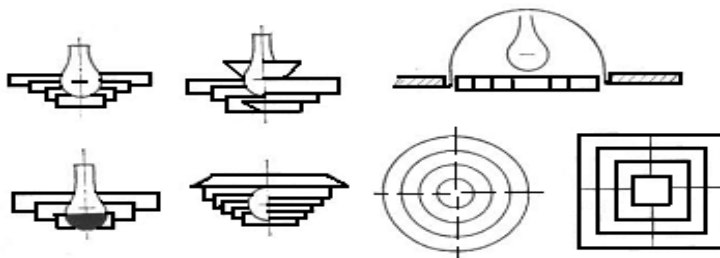


Рис. 3.40 - Варіанти світильників із ЛР і екранувальними ґратами (кільцевими і квадратними)

пластмаси, рідше з пофарбованого металу.

Питання для самоперевірки

1. Оптичні елементи, що входять до складу оптичних систем СП.
2. Основні закони геометричної оптики, що використовуються під час побудови оптичних систем СП.
3. Відбивальні оптичні елементи: плоскі, параболоїдні, еліпсоїдні дзеркала.
4. Хід променів у скляному відбивачі.
5. Твердотільний світлодіодний прожектор із параболоїдним відбивачем.
6. Пластинчастий (фацетний) відбивач.
7. Конструкції прожекторів на світлодіодах.
8. Світлозаломлювальні прилади світильників.
9. Принципові схеми ходу упадних і дзеркально відбитих променів світильників.
10. Заломлювальні оптичні системи СП, збиральні та розсіювальні лінзи.

11. Основні співвідношення для лінз: оптична сила, фокусна відстань, фокусна відстань системи з декількох лінз.
12. Побудова зображень позитивними та негативними лінзами.
13. Призми у СП.
14. Лінзи Френеля. Дискові циліндричні лінзи й лінзи з профілем Аллару.
15. Заломлювачі СП.
16. Комбіновані системи. Щілинні світловоди. Варіанти світлотехнічних схем освітлювальних приладів з щілинними світловодами.
17. Оптичні системи автомобільних фар. Фари поляризованого світла.
18. Освітлювальні системи з гнучкими волоконними світловодами.
19. Основні переваги оптичних приладів з гнучкими волоконними світловодами.
20. Перспективні галузі застосування гнучких волоконних світловодів.
21. Дифузні екранувальні відбивачі, ґратниці, кільця.

4. МЕТОДИ СВІЛОТЕХНІЧНОГО РОЗРАХУНКУ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ

Прямий розрахунок СП - пошук світлотехнічних характеристик СП для заданих оптичної частини і джерела світла.

Зворотний розрахунок СП - визначення геометричних параметрів оптичної частини за заданими світлотехнічними характеристиками СП, що працює з певним джерелом світла.

Методи розрахунку СП можна поділити на дві групи. Перша - базується на розрахунку світлового потоку, випромінюваного СП в різні зони простору або на різні ділянки поверхні освітлюваного об'єкта. Вони здійснюються за допомогою припущення щодо точковості джерела світла. Це спрощує визначення кордонів у просторі поширення світлових потоків від різних ділянок оптичної частини. При цьому розподіл світлового потоку, що падає від СП у певну зону простору, вважається рівномірним (рис. 4.1).

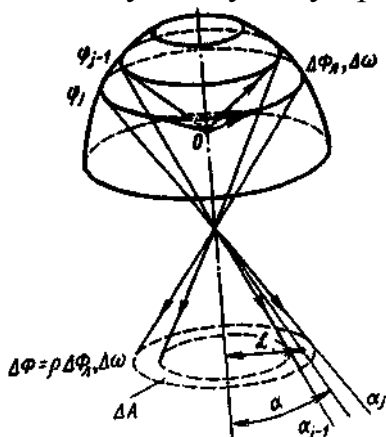


Рис. 4.1 – Розрахунок СП за способом світлового потоку

Зазначені припущення дають задовільний результат лише в разі відносно малого розміру світлого тіла та за приблизно однакових сил світла в різних напрямках. Цей спосіб доцільно використовувати для СП із дифузно-розсіювальних матеріалів, коли форма та розміри ДС не позначаються на світлорозподілі, а також в оптичних пристроях, які слабо концентрують світловий потік і працюють із простими за формами і малими за розмірами ДС.

Друга група методів базується на розрахунку площі та яскравості видимої світлої частини СП з певного напрямку простору (рис. 4.2) або із заданої точки спостереження (рис. 4.3). Далі визначають розподіл в першому випадку сили світла, у другому - освітленості.

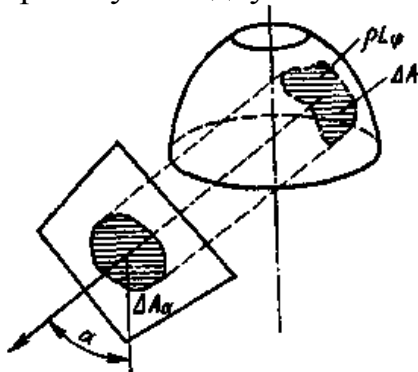


Рис. 4.2 – Розрахунок СП за способом площі та яскравості світлої частини

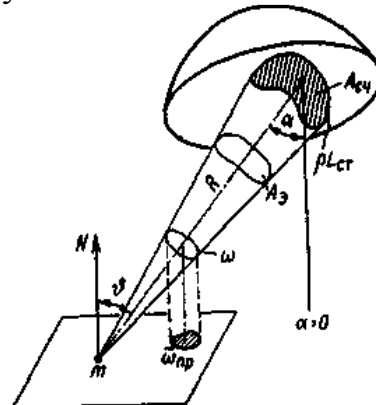


Рис 4.3 – Розрахунок освітленості за світлою частиною СП

4.1. Методи розрахунку СП за площею та яскравістю світлої частини

Розрахунок СП за площею та яскравістю світлої частини послуговується променевим описом поширення енергії оптичного випромінювання. При цьому вважається, що простір насичений променями, які мають подвійне визначення. Для їхньої характеристики інколи використовують уявлення геометричної оптики, у якій нехтують довжинами хвиль оптичного випромінювання. Енергетична характеристика вимагає залучення поняття фізичного (світлового) променя як пучка геометричних променів, що виділяються у просторі двома безкінечно малими діафрагмами, однак із розмірами, набагато більшими за довжину хвилі випромінювання. Таке тлумачення променів передбачає якісний стрибок від поняття геометричних променів, які становлять лише напрямки поширення енергії, до сукупності, що може переносити енергію й характеризується величинами потоку, сили та яскравості випромінювання. Методи розрахунку СП за яскравістю та площею світлої частини розділені за тим, як групуються ними промені, що посилаються СП.

4.1.1. Метод оптичних зображень

Велика кількість методів розглядають кожен промінь, що випускається із ДС, і прослідковують його проходження в оптичній системі. Таким способом часто послуговуються під час розрахунку оптичних приладів. При цьому основою є аналіз оптичного зображення джерела, його називають *методом оптичних зображень*.

Метод передбачає чітке зображення всього ДС і світіння всієї поверхні для точок освітлюваної поверхні, розташованих усередині зображення, а також повне її згасання для точок, що перебувають поза зображенням. Оскільки СП не створюють досконалого зображення і для них характерне не лише повне, але і часткове світіння поверхні, застосування методу оптичних зображень може призвести до великих помилок. Крім того, розгляд ходу кожного променя, що випускається джерелом, пов'язаний із громіздкістю методу та втратою ним фізичної наочності.

Можна розрахувати яскравість і площу світлої частини СП, прослідковуючи хід сукупності умовних променів, які впали на поверхню оптичної системи із зовнішньої області обраного напрямку, прослідкувавши зворотний хід променів із довколишнього середовища крізь оптичну систему до джерела світла (рис. 4.4).

Застосовуючи для «зворотного» променя правила дзеркального віддзеркалення або заломлення, знаходять точку зустрічі його з ДС у точці з певною яскравістю. Отже, за напрямком $\alpha_1\beta$ точка М дзеркальної поверхні світитиме з певною яскравістю. Якщо кинути на точку М промінь по напрямку $\alpha_2\beta$, то після віддзеркалення він пройде повз ДС, і точка М за цим напрямком не світитиме.

4.1.2. Метод зворотного ходу променів

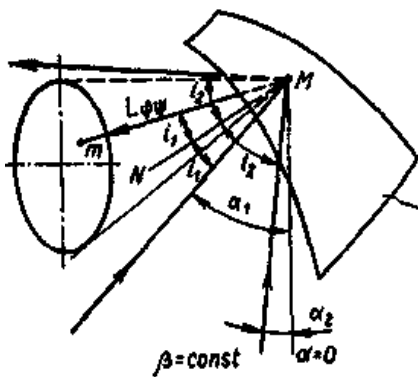


Рис. 4.4 – Розрахунок світлої частини СП за допомогою зворотного ходу променя

Так, «обстрілюючи» дзеркальну або заломлювальну поверхню променями, паралельними обраному напрямку, знаходять всі світлі точки для цього напрямку.

Цей метод має високу точність обліку форми, розміру та яскравості джерела в цій оптичній системі. Основним недоліком методу зворотного променя є відсутність фізичної наочності, бо під час використання цього методу неможливо сказати про прилад щось конкретне, доки не будуть проведені всі розрахунки.

4.1.3. Метод елементарних відображень

Методи розрахунку площі та яскравості світлої частини СП можна

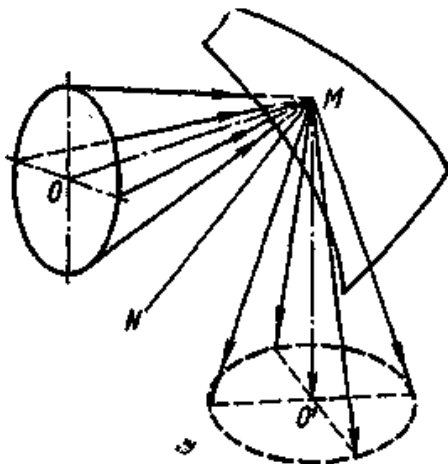


Рис. 4.5 – Групування променів у канонічні пучки

зробити менш громіздкими й наочними, якщо безліч променів джерела й оптичної системи об'єднати в певну підмножину. Таке групування надає узагальнену інформацію про всі точки оптичної системи і властивості ДС.

Найбільш просте групування променів - їхнє кінчне групування. При цьому вважається, що весь простір насичений світловими променями, складниками кінчних пучків із вершинами на точках випромінювальних або опромінювальних поверхонь.

Промені, що падають із джерела на поверхню оптичної системи, зібрані в кінчні пучки з основою на ДС і вершинами в точках вхідної поверхні оптичної системи (рис. 4.5). Світловий пучок СП також складається з кінчних пучків, вершини яких лежать на точках випромінювальної поверхні СП, а їхні розміри, форма та місце розташування у просторі визначаються розмірами й формою кінчних пучків ДС, а також властивостями самої оптичної системи (рис. 4.6). Кінчні пучки променів, спрямовані в зовнішній простір СП, містять достатню інформацію про ДС оптичну систему, щоб судити про розміри та яскравість його світлої частини.

Із метою визначення ділянки поверхні оптичної системи, що світить у заданому напрямку, слід знайти сукупність точок, конічні пучки яких мають промені, паралельні цьому напрямку.

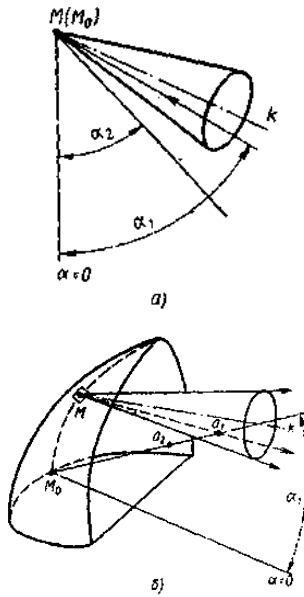


Рис 4.6 – Свічення точки M а) для безкінечно великої відстані світить у напрямку α_1 ; б) для кінцевої відстані світить у точку a_1

У разі визначення освітленості на близькій відстані світла частина визначається сукупністю конічних пучків, що мають промені, які перетинаються в розрахунковій точці d . У цьому методі розрахунку світлої площі конічні пучки називаються *елементарними відображеннями* (ЕВ), а сам метод - методом елементарних відображень (МЕВ). Таким чином, елементарними відображеннями називають конічні пучки світлових променів, що падають від світлого тіла на точку поверхні оптичного пристрою і послані їм в довколишній простір. Елементарні віддзеркалення можуть бути в упадному, відбитому або пропущеному світлі.

4.2. Властивості елементарних відображень

Форма та розміри елементарних відображень

Елементарні відображення є конічними тілами з певною формою та розмірами. Промені, що перебувають на поверхні цього тіла, називаються крайовими променями ЕВ. Кут між крайовими променями в певній площині, що перетинає ЕВ по його вісі, називається кутовим розміром ЕВ.

Розміри ЕВ в упадному, відбитому й пропущеному світлі при одному і тому ж світлому тілі не дорівнюють один одному. У окремих випадках спостерігається ідентичність їхньої форми й тотожність кутових розмірів. Кутові розміри упадного ЕВ і його форма повністю залежать від форми та видимих розмірів світлого тіла. Для більшості простих форм ДС достатньо узяти дві січні площини і для них визначити лінійні видимі й кутові розміри ДС. Такими площинами є меридіональна, що проходить через нормаль N , точку поверхні M і її радіус-вектор $r = OM$ (рис. 4.7, а), сагітальна, яка проходить через радіус-вектор r і перпендикулярна меридіональній (рис. 4.7, б). Сагітальна площина віддалена від нормалі N на кутову відстань - на кут падіння вісьового променя. Кутові розміри ЕВ кульового ДС в цих двох площинах знаходяться з прямокутних трикутників MO_1O (рис. 4.7, а) і MO_2O (рис. 4.7, б):

$$2\xi_C = 2\xi_{\text{СП}} = 2\arcsin(d/2r), \quad (4.1)$$

де d — діаметр джерела світла.

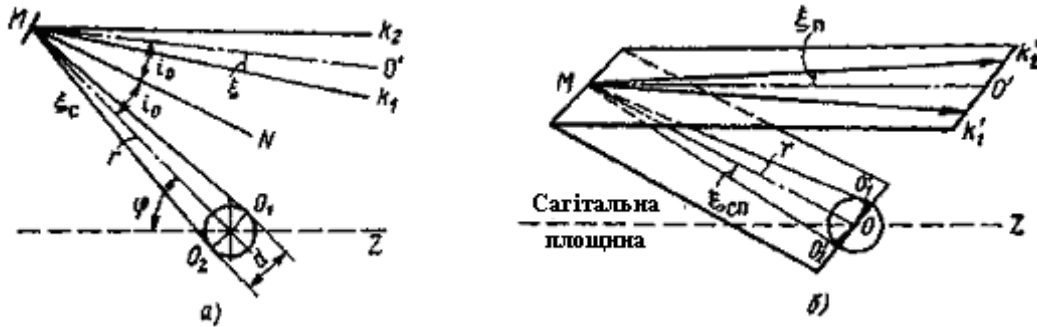


Рис. 4.7 - Головні площини, що пересікають ЕВ при кульовому ДС: а) меридіональна; б) сагітальна у відповідному відображенні світла

Кутові розміри ЕВ, що падають від дискового ДС, у двох головних площинах можна визначити так само, як і розміри ЕВ, що падає від кульового джерела. Видимий лінійний розмір дискового світлого тіла (рис. 4.8, а) в меридіональній площині $d' = O_1a_1 + O_2a_2$. Він визначає кутовий розмір упадного ЕВ:

$$\begin{aligned} \xi_{C1} &= \arctg[d \cos \varphi / (2r + d \sin \varphi)], \\ \xi_{C2} &= \arctg[d \cos \varphi / (2r - d \sin \varphi)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Відзначимо, що у випадку $d \gg r$ $\xi_{C1} = \xi_{C2} = \arctg(d \cos \varphi / 2r)$ або $\xi_C \approx d \cos \varphi / 2r$

У сагітальній площині (рис. 4.8, б) диск пересікається по прямій, яка перпендикулярна радіусу-вектору, тому його видимий розмір дорівнює розміру ДС d , а кутовий розмір:

$$\begin{aligned} 2\xi_{\text{СП}} &= 2\arctg(d/2r) \text{ при } r \gg d; \\ 2\xi_{\text{СП}} &\approx d/2r \text{ при } d \gg r. \end{aligned}$$

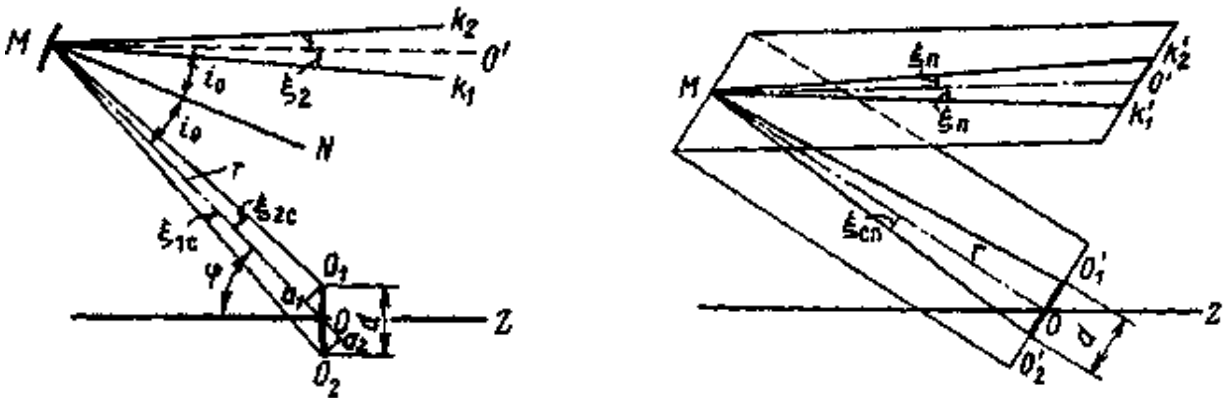


Рис. 4.8 – Кутові розміри ЕВ при дисковому джерелі світла в головних площинах а) меридіональна, б) сагітальна

Таким чином, кутові розміри упадного ЕВ (ПЕВ) у цьому випадку змінюються від мінімального $(\xi_{1C} + \xi_{2C})$ у меридіональній площині до максимального $2\xi_{СП}$ у сагітальній. Тому упадне ЕВ при дисковому ДС є еліптичним конусом.

Форма і розміри ЕВ, що відбиті дзеркальною поверхнею

Для ідеальної дзеркальної поверхні будь-який промінь, що впав на її точку, буде відбитий у напрямку, який становить із нормаллю кут, тотожний куту його падіння. Тому кутові розміри ЕВ в упадному й відбитому світлі будуть тотожними, і їхня форма буде однаковою.

Наприклад, для кульового ДС вісьовий промінь у меридіональній площині ОМ складає з нормаллю N (див. рис. 4.7, а) кут i_0 , у полі віддзеркалення промінь лежатиме в тій же площині й піде в напрямку МО', віддаленому від нормалі на кут i_0 . Отже, промінь МО' буде вісьовим променем відбитого ЕВ. Крайовими променями ЕВ будуть промені Мк₁ і Мк₂, так вони складають з нормаллю кути $(i_0 + \xi_C)$ і $(i_0 - \xi_C)$ відповідно. Отже, кутовий розмір відбитого ЕВ у цій площині $2\xi = 2\xi_C$.

Відбитому світлу (рис. 4.7, б) сагітальній площині відповідатиме площина, перпендикулярна меридіональній, що проходить через вісьовий МО, промінь ЕВ. Крайові промені Мк'₁ і Мк'₂ відбитого ЕВ лежать у цій перпендикулярній площині та складають з вісьовим променем МО' кут ξ_{Π} . Унаслідок однакового віддалення цих площин від нормалі i_0 кутові розміри, що лежать у цих площинах, рівні, тобто $\xi_{\Pi} = \xi_{СП}$. Для кульового світлого тіла $\xi = \xi_{\Pi}$, що й визначає колову конічну форму упадного ЕВ, відбитого дзеркальною поверхнею (рис. 4.9).

Для дискового ДС (рис. 4.8, а) кутові розміри відбитого ЕВ ξ_1 і ξ_2 - у меридіональній площині визначаються розмірами ξ_{1C} і ξ_{2C} упадного ЕВ. У сагітальній площині (рис. 4.8, б) кутовий розмір упадного ЕВ дорівнює $2\xi_{СП}$. У відбитому світлі розміри ЕВ визначаються променями Мк'₁ і Мк'₂, що складають із вісьовим променем ОМ' кути $\xi_{\Pi} = \xi_{СП}$. Відбите ЕВ, так само як і упадне, становитиме еліптичний конус.

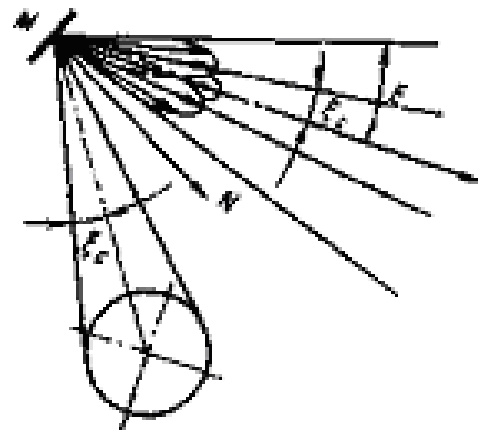


Рис. 4.9 – ЕВ в упадному й відбитому світлі, слід ЕВ

Світловий потік і яскравість променів ЕВ

На рис 4.10 наведена частина тіла джерела світла, що світить, із малим елементом $d\sigma$ на його поверхні та ділянка дзеркально відбиваючої поверхні з малим елементом dS .

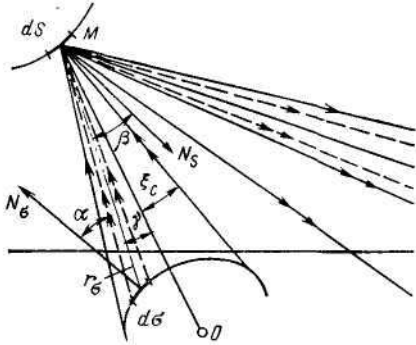


Рис. 4.10 – Схема для визначення світлового потоку ЕВ

На кожну точку елементу dS падає пучок променів від кожної малої ділянки джерела. При цьому всі конічні пучки мають вершину у відповідній точці елемента dS і тотожній основі й називаються елементарними відображеннями в упадному світлі. Безкінечно малий світловий потік, що падає з елемента поверхні світного джерела на елемент dS відбивача, розташований у цих конічних пучках:

$$d^2\Phi = L dM_1 dM_2, \quad (4.1)$$

де L - яскравість світлових променів від ділянки $d\sigma$;

dM_1 - кількість елементарних відображень в упадному світлі;

dM_2 - кількість променів в елементарному відображенні.

Якщо одне ЕВ в упадному світлі потрапляє вісьовим променем в одну точку поверхні дзеркального елемента, то кількість dM_1 усіх ЕВ можна виразити площею поверхні цього елемента, перпендикулярну вісям цих ЕВ:

$$dM_1 = dS \cos \beta \quad (4.2)$$

Кількість променів в ЕВ в упадному світлі визначається розміром елементарного тілесного кута, який стягується елементом відносно точок на поверхні dS (а точніше - проекцією цього тілесного кута на площину, перпендикулярну напрямку світіння всього джерела, тобто напрямку ОМ)

$$dM_2 = \frac{d\sigma \cos \alpha \cos \gamma}{r_\sigma^2} \quad (4.3)$$

Таким чином,

$$d^2\Phi = L \frac{dS d\sigma \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma}{r_\sigma^2}. \quad (4.4)$$

Проінтегрувавши вказані величини за поверхнями джерела світла і дзеркального елемента, отримаємо, що світловий потік, який падає на цей елемент віддзеркалювальної поверхні від усього джерела світла (світловий потік в ЕВ упадного світла), дорівнює:

$$d\Phi = LM_1 M_2 = L dS \cos \alpha \pi \sin^2 \xi_C. \quad (4.5)$$

Ураховуючи малі значення кута:

$$d\Phi = L\pi\xi_C^2 dS \cos \alpha. \quad (4.6)$$

Відбитий світловий потік, тобто світловий потік в ЕВ:

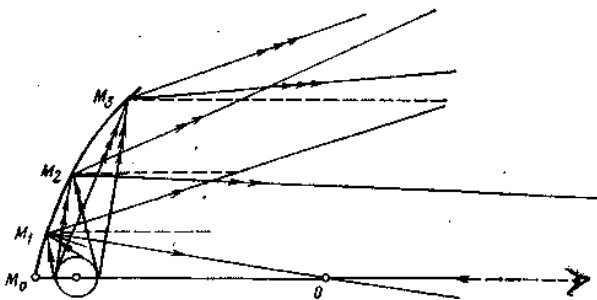
$$d\Phi_{\Sigma O} = \rho d\Phi = \rho L\pi\xi_C^2 dS \cos \alpha, \quad (4.7)$$

де ρ - коефіцієнт віддзеркалення поверхні відображального елемента.

Таким чином, із рівняння (4.7) видно, що яскравість світлових променів ЕВ дорівнює яскравості відповідних променів джерела, помножених на ρ оптичної системи:

$$L_{\Sigma O} = \rho L. \quad (4.8)$$

Для визначення яскравості променя необхідно продовжити цей світловий промінь ЕВ у зворотному напрямку (всередину оптичної системи) до точки віддзеркалення, а потім далі до перетину зі світною поверхнею джерела світла.



4.11 – Світіння точок оптичної

системи в заданому напрямку

у світловому отворі однієї й тієї ж оптичної системи за зміни напрямку спостереження зазвичай випадку не лишається постійним. При цьому для кожного типу оптичних систем властива своя закономірність кутової зміни форми та розміру зображення у світловому отворі. У той же час визначення цих характеристик зображень має, як буде показано нижче, особливо важливе значення для розрахунку сили світла СП в цьому напрямку.

Принципово важливим є положення теорії ЕВ, яке стверджує, що точку оптичної системи можна побачити світлою лише з того напрямку спостереження, який потрапляє всередину ЕВ, що виходить із цієї точки. Це положення ілюструє рис. 4. 11 спостерігачеві, який бачить оптичну систему з напрямку оптичної вісі, що всі точки профільного перетину відбивача, ЕВ яких включає наведений пунктиром напрям спостереження, світлі, зокрема, точки M_1 і M_2 . У той же час точка M_3 з цього напрямку виглядає темною. Цей же рисунок свідчить, що під час спостереження оптичної системи під кутом у напрямку M_1O крайнього внутрішнього променя ЕО точки M_1 , остання

Світіння оптичної системи СП

Оптична система СП створює у своєму світловому отворі зображення джерела світла, що становить сукупність точок поверхні оптичної системи, які виглядають світлими під заданим кутом спостереження.

Зображення джерела світла в

виглядатиме світлою при віддаленні від відбивача за оптичною віссю приладу лише починаючи з відстані M_0O .

Безабераційний параболоїдний відбивач створює ЕВ, усі вісьові промені яких паралельні оптичній вісі. За умови кінцевих розмірів джерел світла і відбивачів це означає, що крайні внутрішні промені будь-якого ЕВ із певної відстані перетнуть оптичну вісь. Це умова того, що, починаючи з цієї відстані, усі точки світлового отвору параболоїдного відбивача виглядають світлими, тобто збільшене зображення джерела світла зайняло весь світловий отвір.

Якщо ж, перебуваючи поза цією відстанню, почати розглядати параболоїдний відбивач не з оптичної вісі, а змістившись від неї, то залежно від розміру цього переміщення, картина змінюватиметься. Якщо на початку при малому переміщенні всі точки відбивача залишатимуться світлими, то зі збільшенням бічного переміщення, тобто збільшенням кута спостереження в екваторіальній площині, окремі точки перестануть бути світлими. Це ті точки, кутовий розмір ЕВ яких найменший, тобто найбільш віддалені точки крайніх зон відбивача. Зі зменшенням кількості видимих світлих точок знижуватиметься сила світла оптичної системи приладу, яка для певного напрямку дорівнюватиме нулю за повністю темного світлового отвору.

Параболо-циліндричний відбивач, що має параболічну поверхню у профільному перетині, підкоряється тим же законам, що й параболоїд. У меридіональних поперечних площинах, починаючи з певної відстані спостереження за оптичною віссю СП, буде видно збільшене зображення джерела світла у світловому отворі відбивача, яке має форму вертикальної смуги з висотою, що тотожна висоті світлового отвору, і шириною, яка дорівнює довжині лінійного джерела світла. Така оптична система створює світловий пучок не у вигляді конуса, як параболоїд, а у вигляді віяла, розгорнутого в головній подовжній площині. І якщо під час спостереження збоку у профільній площині картина світіння світлового отвору повторює описану картину для параболоїда обертання, то для бічних напрямів у головній подовжній площині характер світіння буде іншим, підкоряючись законам, властивим плоскому дзеркалу.

Вісі ЕО точок перетину плоского дзеркала розгорнуті віялом тому, що зі збільшенням кута падіння світлового пучка на дзеркало відповідно

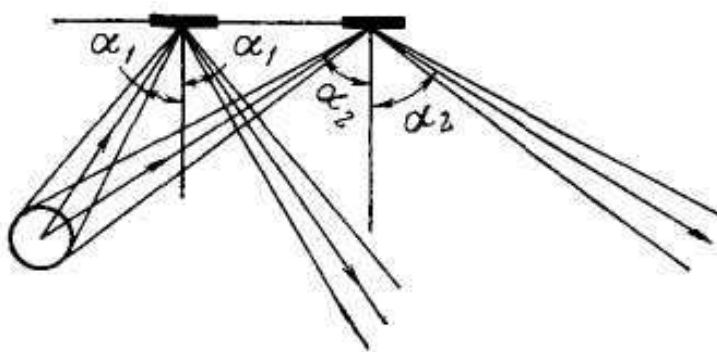


Рис. 4. 12 – Віддзеркалення світлового пучка від плоского дзеркала

збільшується кут віддзеркалення і відбувається зсув по дзеркалом світлового зображення джерела випромінювання (рис. 4.12) зі зміною кута спостереження. Якщо лінійний розмір плоского дзеркала в подовжній площині більший за розмір джерела світла, то зі збіль-

шенням кута спостереження відносно оптичної вісі світлова частина світлового отвору пересуватиметься від центру до краю відбивача (при цьому може змінюватися й розмір світлої частини). Після досягнення світлим зображенням джерела світла краю відбивача і при подальшому збільшенні кута спостереження світла пляма, поступово зменшуючись, зникає повністю. Закономірність зміни розмірів світлої частини світлового отвору з моменту, коли зображення джерела вперше торкнулося краю відбивача, до повного зникнення світлої частини і спаду сили світла до нульового значення називається крайовим ефектом оптичної системи.

Проекція оптичної системи і світлового пучка на площину

Із метою віднайдення розміру світлового отвору оптичної системи в кожному окремому напрямку, який визначає разом із яскравістю джерела випромінювання силу світла приладу, необхідно знати форму і площу зображення джерела в оптичній системі. Успішне вирішення цього завдання можливе у тому випадку, коли на графік, що дає площинне зображення оточуючого СП простору, наноситься відображення поверхні всієї оптичної системи або окремої її зони, а також світлового пучка приладу у вигляді безлічі слідів ЕВ.

Існує низка картографічних методів відображення простору, із яких у світлотехнічній практиці розрахунку світлових приладів найпоширеніша еквідистанційна проекція. У низці робіт використана циліндрова поперечна проекція сфери. Приклад еквідистанційної проекції простору на безкінечно віддалену площину P , перпендикулярну оптичній вісі світлового приладу, наведено на рис. 4.13, на який нанесена сітка полярних кутових координат α та β . На рис. 4.14 усі меридіональні плоскості, що проходять через весь прилад, утворюють на площині P пучок прямих, що проходять крізь слід вісі світлового приладу - точку O .

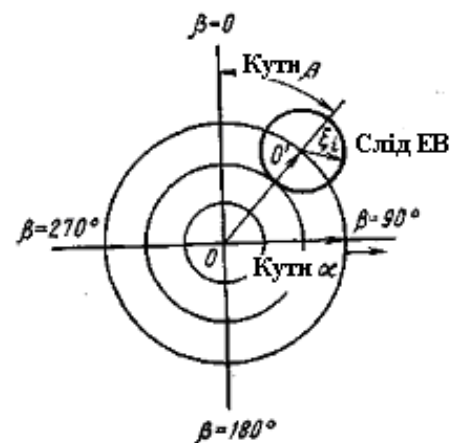


Рис. 4.13 – Слід ОЕ на графіку полярних координат

Будь-які напрями α в цій меридіональній площині β зображуються на цьому графіку точками, що лежить на прямій β на відстані від початку координат, тотожному значенню кута α . Якщо зробити масштаб кутів α постійним для всього графіка (насправді, під час проектування оточуючої світлової прилад сфери на площину всі паралелі перебувають одна від одної на різних відстанях), то простори на площині P зображатимуться системою радіальних прямих β і рівновіддалених концентричних кіл α . Використання такої найпростішої картини простору можливе за умови введення в розрахунки кореляційних коефіцієнтів $C_{\alpha, \beta}$, що враховують дійсну нерівномірність лінійного масштабу кутів α .

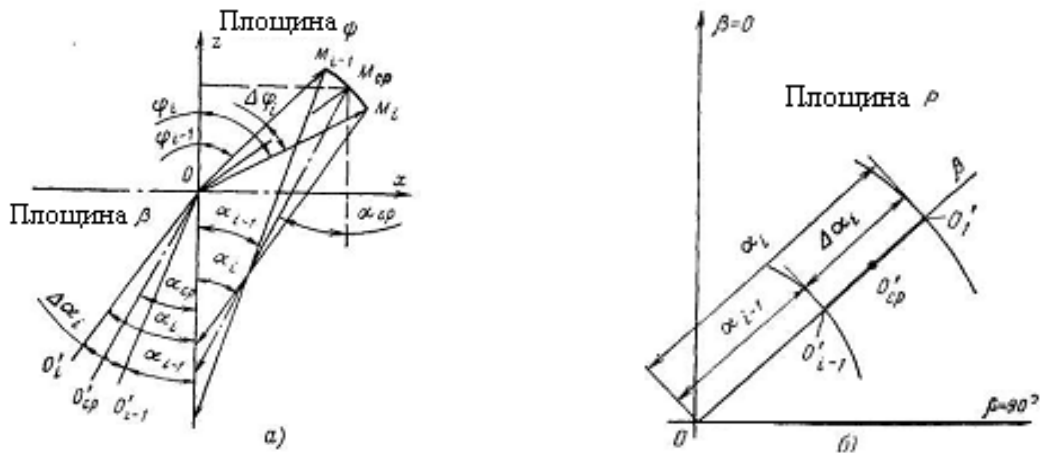


Рис. 4.14 – Розворот вісьових променів $\Delta\alpha$ (а) ділянки дзеркальної поверхні (у меридіональній площині) і його відображення (б) на графіку полярних координат

Для кожної точки M_i відбивача, що визначається кутами ψ і φ внутрішньої області простору, є один відбитий у цій меридіональній площині ψ вісьовий промінь OO' , орієнтований в зовнішньому просторі кутами α і β (при цьому кути, що визначають положення меридіональних січних площин, тожні, тобто $\psi = \beta$) який відображається на площині P точкою з координатами α_i, β (рис. 4.14, б). Отже, образом точки поверхні оптичної системи є слід вісьового променя EO цієї точки.

Якщо вважати, що криволінійний відрізок M_{i-1}, M_i є перетином меридіональною площиною (рис. 4. 14, а) колової зони відбивача, то ця зона формує світловий пучок, що характеризується в меридіональній площині $\psi = \beta$ розворотом вісьових променів $EO \Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_{i-1}$ (рис. 4. 14, б). Відрізок $\Delta\alpha$ на прямій β є відображенням на графіку полярних координат α_i, β відрізка M_{i-1}, M_i колової зони дзеркального відбивача в його меридіональному перетині. Відображення ділянки колової зони M_{i-1}, M_i в екваторіальному перетині (на рівні середини зони в точці M_{cp}) наведена на рис. 4.15 у вигляді дуги кола $\Delta\beta_i$ із радіусом α_{cp} , воно характеризується розворотом вісьових променів $\Delta\beta = \beta_j - \beta_{j-1}$.

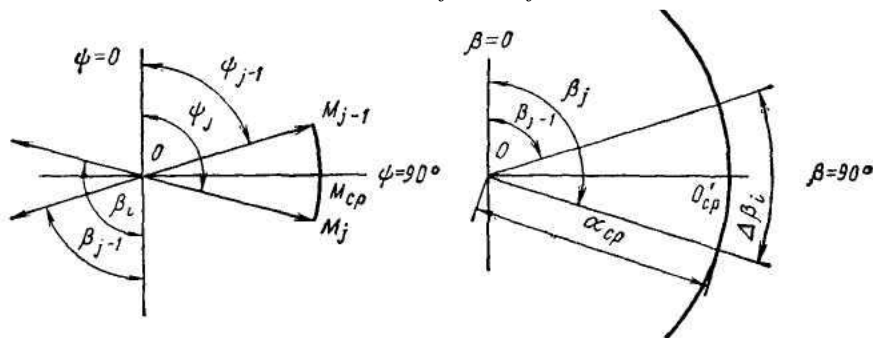


Рис. 4.15 – Розворот вісьових променів $\Delta\beta$ (в екваторіальній площині) і його відображення

Показником концентрації світлового випромінювання елементами оптичної системи в меридіональних площинах є коефіцієнт K :

$$K = \Delta\alpha / 2\xi \quad (4.9)$$

При цьому умовне значення кутового розміру 2ξ для цього оптичного елемента (або його зони) вважається незмінним. Коли $\Delta\alpha = 0$, $K = 0$ і прилад здійснює найбільшу концентрацію світлового потоку в цьому напрямку, то ЕВ всіх точок зони відбивача зливаються в одне ЕВ, сліди вісьових променів усіх цих ЕВ поєднуються в одну точку, а зона M_{i-1}, M_i (або ділянка зони M_{j-1}, M_j в екваторіальній площині) відображається на площині P однією точкою O'_{CP} .

Відображення на площині всієї поверхні зони оптичної системи можна отримати виходячи з розглянутих вище принципів побудови відображення точки відбивача та ділянки його зони. З'єднавши плавними кривими точки відрізків $\Delta\alpha$ для багатьох радіусів β , що відповідають різним меридіональним площинам ψ , отримаємо замкнену область - геометричне місце точок слідів вісьових променів усіх ЕВ точок цієї зони відбивача. Ця область слідів вісьових променів є відображенням на площині P координат α, β поверхонь дзеркальної зони. Для колосиметричних світлових приладів область слідів вісьових променів чверті зони з розворотом $\Delta\alpha$ зображена на рис. 4.16, а у вигляді заштрихованої ділянки кільця.

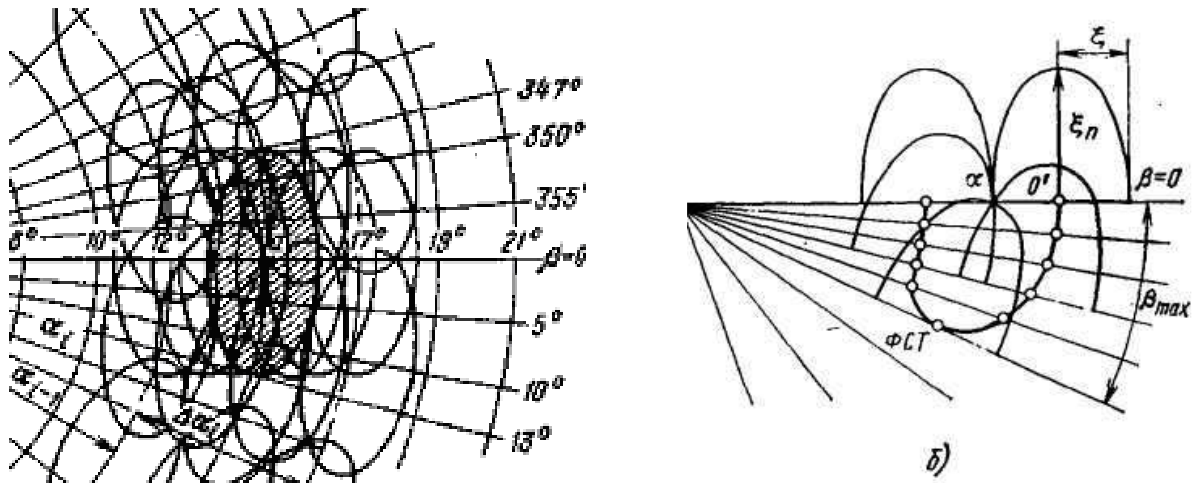


Рис. 4.16 – Зональне відображення і ФСТ для світлого тіла, у вигляді диска (а) і графічний метод його побудови (б)

Тоді, коли ця зона посиляє пучок паралельних оптичних вісі променів $\Delta\alpha = 0$, область слідів вісьових променів цієї зони перетворюються на точку, розташовану в центрі координат. Безліч слідів ЕВ (разом із областю слідів їхніх вісьових променів), що є проекцією світлового пучка зони на площину, називають зональними відображеннями. Сукупність зональних відображень дозволяє отримати повну картину відображення всього світлового пучка оптичної системи СП. Необхідно відзначити, що зональне відображення дає

значно більшу кількість інформації про формування світлового пучка поверхнею оптичної системи, ніж область слідів вісьових променів, за якою не можна судити про розміри, форми і орієнтацію у просторі ЕВ різних точок зони оптичної системи.

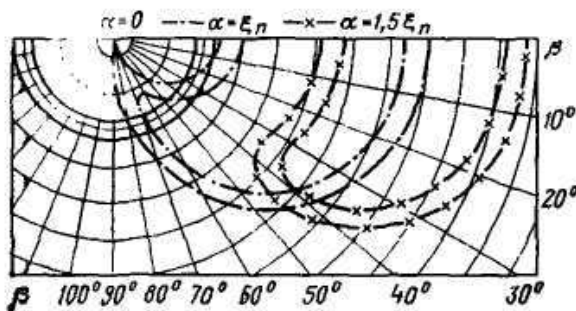
Зональні відображення є основою визначення ділянок оптичних систем СП, виглядають світлими в кожному конкретному напрямку. Із напрямку α (на площинному графіку полярних координат α, β) світлими виглядають всі ті точки відбивача, ЕВ яких перекривають або торкаються точки α (рис. 4.16). Область слідів цих ЕВ утворює на графіку так звану фігуру світлих точок. Таким чином, фігура світлих точок (ФСТ) - образ світлої частини поверхні оптичної системи для заданого напрямку спостереження α, β , який визначається як геометричне місце слідів вісьових променів ЕВ, що перекривають цей напрямок простору.

Ураховуючи важливість ФСТ для розрахунку оптичних систем СП, розроблено методи як графічної побудови, так і аналітичного пошуку ФСТ для основних геометричних замінників тіл світних джерел світла.

Під час графічної побудови ФСТ (рис. 4.16) слід ЕВ зони, розміри якого для всіх точок зони приймаються незмінними, поєднується зі своєю віссю, відповідного розміру ξ , з прямою β , яка становить слід відповідну меридіональну площину, і переміщається нею доти, доки контурна лінія сліду ЕВ не торкнеться точки α - напрямку простору, що цікавить нас. При цьому положення сліду ЕВ фіксує точка O' сліду вісьового променя. Потім ті ж операції повторюються при поєднанні вісі ЕВ із прямими, що відповідають іншим значенням β . Сукупність знайдених точок дає контур ФСТ. Побудова ФСТ дещо ускладнюється при несиметричному тілі джерела світла відносно вісі СП, при нерівномірному розподілі яскравості його поверхнею, за відсутності круглої симетрії оптичної системи СП. Зокрема, при нерівномірному джерелі світла реальне ЕВ замінюється під час розрахунків декількома умовними ЕВ тієї ж форми, але з постійною яскравістю променів. Для кожного з цих рівнояскравих ЕВ будується своя ФСТ.

Характеристики ФСТ визначаються формою та розміром сліду ЕВ і залежать від напрямку α , для якого знаходиться ФСТ. На рис. 4.17 зображено вигляд ФСТ для еліптичного кільцевого сліду світного тіла ЛР під різними кутами α .

Форма та розміри ФСТ для однієї й тієї ж зони оптичної системи змінюються з кутом α доволі плавно, при цьому основні зміни ФСТ відбуваються в інтервалі кутів α від 0° до $6\xi_I$.



Для кутів α від $6\xi_I$ до 90° зміни форми ФСТ практично мало значущі. Для вісьового напрямку $\alpha = 0$ ФСТ колосиметричних світних тіл і зон

Рис. 4.17 – ФСТ еліптично-кільцевого сліду ЕВ для ЛР

оптичних систем завжди становлять коло радіуса ξ (при суцільному світному тілі) або кільцем завтовшки $\Delta\xi$ (при несучільному світному тілі), де $\Delta\xi$ - кутовий розмір частини сліду ЕВ у подовжній площині $\beta = 0$.

Аналітичний розрахунок форми та розміру ФСТ проводиться на основі вирішення рівнянь контурної лінії фігури світних точок, складених із урахуванням особливостей геометрії тіла світного джерела.

Сила світла оптичної системи СП

Відповідно до принципу Максвелла сила світла оптичної системи СП у певному напрямку дорівнює похідній яскравості світлої частини поверхні оптичної системи на площу її проекції в цьому напрямку:

$$I_{\alpha\beta} = \int_C L(\alpha, \beta) dS(\alpha, \beta) \cos \sigma(\alpha, \beta), \quad (4.10)$$

де $L(\alpha, \beta)$ - яскравість у напрямку α, β елемента поверхні $dS(\alpha, \beta)$, який є світлим з цього напрямку; $\cos \sigma$ - кут між нормаллю до елемента $dS(\alpha, \beta)$ і напрямком α, β , що визначає проекцію площини елемента $dS(\alpha, \beta)$ на обраний напрямок α, β .

Таким чином, для розрахунку сили світла оптичної системи необхідно знайти площу світлої частини поверхні оптичної системи в заданому напрямку. Це завдання вирішується за допомогою розглянутої вище системи відображень світлового пучка й оптичної системи на площину, що дозволяє визначити частку поверхні цієї світлої зони, або так званий коефіцієнт заповнення $K_{\alpha\beta}$ світлою частиною поверхні оптичної системи. Оскільки розрахунок коефіцієнтів заповнення базується на операціях із слідами ЕВ, кутові розміри та форма яких значно залежать від положення елемента поверхні оптичної системи відносно джерела світла, прийнято для спрощення розрахунків поділяти поверхню оптичної системи на зони, у межах яких форма та розмір ЕВ можна прийняти однаковими. У цьому випадку за наявності низки зон, що формують світловий пучок оптичної системи, рівняння (4.10) для сили світла всього СП можна подати як вираз для суми сил світла від світлих у заданому напрямку ділянок усіх зон:

$$I_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^n I_i(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n L_i(\alpha, \beta) S_i(\alpha, \beta) \cos \sigma_i(\alpha, \beta), \quad (4.11)$$

де i - номер зони, загальна кількість яких n ; $L_i(\alpha, \beta)$ - яскравість світлої частини зони в напрямку α, β ; $S_i(\alpha, \beta)$ - площа поверхні частини зони i , яку можна побачити світлою в напрямку α, β ; $\sigma_i(\alpha, \beta)$ - кут проекції $S_i(\alpha, \beta)$ на площину, перпендикулярну напрямку α, β . При цьому:

$$S_i(\alpha, \beta) = K_{\alpha\beta i} S_\varphi \quad (4.12)$$

де S_φ - повна площа зони поверхні оптичної системи, орієнтована кутом φ .

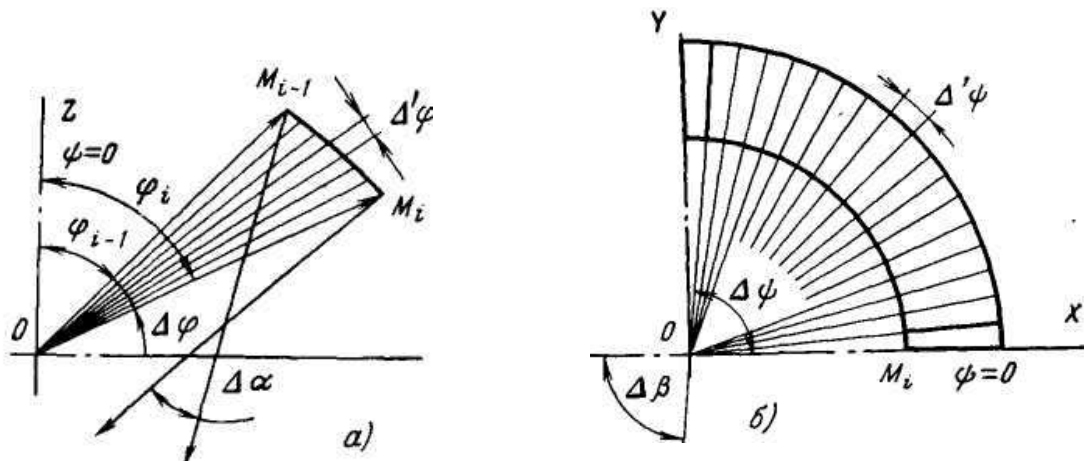


Рис. 4.18 – Поділ зони на низку дрібних елементів із конічними (а) та меридіональними (б) площинами

Отже, для розрахунку сили світла СП необхідно знайти значення $K_{\alpha\beta}$, S_{φ} , $L_i(\alpha, \beta)$.

Коефіцієнт заповнення $K_{\alpha\beta i}$ світлою частиною поверхні зони й оптичної системи можна записати на основі (4.12) як:

$$K_{\alpha\beta i} = \frac{S_i(\alpha, \beta)}{S_{\varphi}}. \quad (4.13)$$

Існує низка методів (графічних і аналітичних) розрахунку коефіцієнтів $K_{\alpha\beta i}$ із урахуванням різної концентрації світлового потоку, концентрації (4.10), що характеризується показником колосиметричних і несиметричних зон. Зона з кутовим розміром $\Delta\varphi$ (рис. 4.18, а) розділяється низкою конічних поверхонь на групу менших зон із кутовим розміром $\Delta'\varphi$ у профільній площині. Разом із цим отримані колові зони $\Delta'\varphi$ поділяються на низку елементів за допомогою певної кількості меридіональних площин (рис. 4.18, б) із кутовою відстанню $\Delta'\psi$ між ними. Унаслідок одна зона з площею S_{φ} виявилася поділеною на N елементів з розмірами $\Delta'\varphi, \Delta'\psi$.

$$N = \frac{\Delta\varphi\Delta\psi}{\Delta'\varphi\Delta'\psi}, \quad (4.14)$$

де $\Delta\psi$ - кут охоплення зони в поперечній площині: $\Delta\psi = 360^\circ$ для колосиметричних зон.

Площа зони:

$$S_{\varphi} = N\Delta S_{\varphi\psi} \quad (4.15)$$

де $\Delta S_{\varphi\psi}$ - площа одного елемента зони, умовно (для малих значень $\Delta\varphi$) приймається постійною для всієї зони:

$$\Delta S_{\varphi\psi} = \frac{\Delta' \varphi \Delta' \psi \sin \varphi_{CP}}{\cos \alpha'_{CP} \cos \alpha''_{CP}} \quad (4.16)$$

де φ_{CP} і r_{CP} - кут і радіус-вектор, що орієнтують положення середньої точки цього елемента; α'_{CP} і α''_{CP} - проекції на меридіональну й екваторіальну площини кута падіння променя в середню точку елемента.

На рис. 4.19 показані світловий отвір зони, поділеної на N елементів, і область слідів вісьових променів ЕВ, поділену на ту ж кількість N вічок із кутовими розмірами $\Delta' \alpha$ і $\Delta' \beta$.

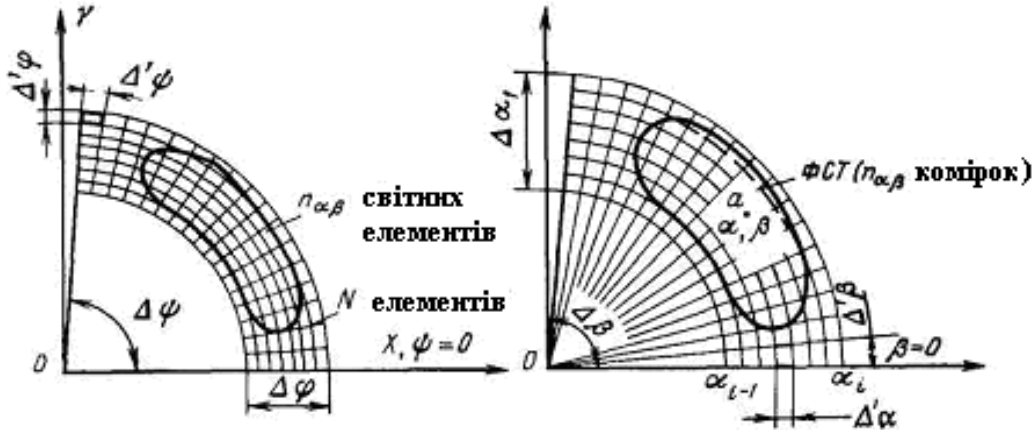


Рис. 4.19 – Поділ зони світлового отвору на елементи (а) і області слідів вісьових променів ЕВ і ФСТ на вічка (б)

При цьому світла частина зони виявляється поділеною на $n_{\alpha\beta}$ елементів, а її образ - ФСТ - на $n_{\alpha\beta}$ вічок. Кількість вічок $\Delta' \alpha$, $\Delta' \beta$ окреслених контуром ФСТ, дорівнює кількості світлих елементів $n_{\alpha\beta}$. Таким чином, площа світлої частини зони в напрямку α, β :

$$S_i(\alpha, \beta) = n_{\alpha\beta} \Delta S_{\varphi\psi}. \quad (4.17)$$

Коефіцієнт заповнення $K_{\alpha\beta i}$ можна записати таким чином:

$$K_{\alpha\beta i} = n_{\alpha\beta} / N \quad (4.18)$$

Для розрахунку коефіцієнта заповнення необхідно побудувати ФСТ, підрахувати кількість вічок $n_{\alpha\beta}$ ФСТ, замінити плавну контурну лінію на ступінчасту, утворену крайніми вічками світлих точок, які перекриваються, врахувати, що:

$$N = \frac{\Delta \alpha \Delta \beta}{\Delta' \alpha \Delta' \beta} \quad (4.19)$$

і не забути кореляційний коефіцієнт $C_{\alpha\beta}$. Таким чином:

$$K_{\alpha\beta i} = \frac{n_{\alpha\beta}}{N} C_{\alpha\beta}. \quad (4.20)$$

Площа частини світної зони, в напрямках α, β визначається за виразом (4.17) після знаходження площі зони S_φ .

Розрахунок площі колосиметричної зони, утвореної обертанням довкола оптичної вісі ділянки поверхні оптичної системи, можна провести за допомогою інтеграції в межах від φ_{i-1} до φ (кутів, що орієнтують початок і кінець зони в меридіональній площині). Площа безкінечно малих елементів поверхні зони dS становить:

$$S_\varphi = 2\pi \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} dS. \quad (4.21)$$

Якщо умовно вважати поверхні всіх нескінченно малих елементів зони кінцевими, то:

$$dS = 2\pi r \sin \varphi dl = 2\pi \frac{r^2 \sin \varphi}{\cos \alpha} d\varphi. \quad (4.22)$$

де dl - довжина відрізання профільної кривої елемента;
 α - кут падіння променя на елемент dS . Тоді:

$$S_\varphi = 2\pi \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \frac{r^2 \sin \varphi}{\cos \alpha} d\varphi \quad (4.23)$$

Унаслідок інтеграції й відкидання малозначущих членів формула площі колосиметричної зони можна представити таким чином:

$$S_\varphi = \frac{\pi^2 \Delta \varphi \sin \varphi_{CP}}{90^\circ \cos \alpha_{CP}}, \quad (4.24)$$

де r_{cp} і φ_{cp} - полярні координати середньої точки зони; α_{CP} - кут падіння вісьового променя на цю точку.

Обчислення світлового потоку за кривими сили світла СП

Розглянемо два найбільш поширені випадки обчислень світлового потоку за КСС. На рис. 4.20 зображений приклад КСС колосиметричного світильника переважно прямого світла. Виділимо елементарний тілесний кут $d\omega$, у межах якого силу світла світильника можна уважати постійною. Значення визначеного тілесного кута дорівнює відношенню площі кульового поясу, на який він спирається, до квадрата радіусу:

$$d\omega = \frac{2\pi r \sin \alpha di}{r^2} = \frac{2\pi r \sin \alpha_{CP} r d\alpha}{r^2} = 2\pi \sin \alpha_{CP} d\alpha \quad (4.25)$$

Елементарний світловий потік, який поширюється в межах цього тілесного кута, дорівнює:

$$d\Phi = I_{\alpha_{CP}} d\omega = 2\pi I_{\alpha_{CP}} \sin \alpha_{CP} d\alpha \quad (4.26)$$

Сумарний потік приладу, знайдений за всією КСС, відшуковується після інтеграції цього виразу в межах від $\alpha = 0$ до $\alpha = \pi$.

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\pi} I_{\alpha} \sin \alpha d\alpha \quad (4.27)$$

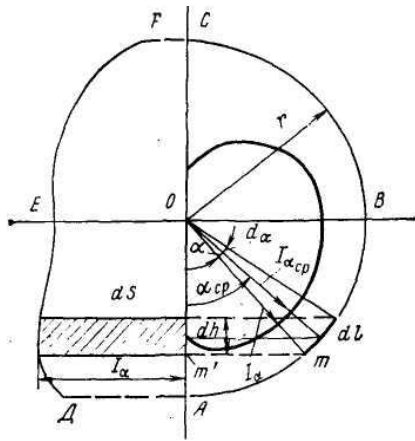


Рис. 4.20 – Розрахунок світлового потоку за КСС колосиметричного СП

На практиці інтегрування за формулою (4.27) замінюють на підсумовування світлових потоків, що поширюються в кінцевих тілесних кутах. При цьому для КСС без чітковиражених максимумів (подібних рис. 4.20) достатньо скористатися десятиградусними кутовими зонами (тобто весь зовнішній простір розбивається кінцевими тілесними кутами (рис. 4.13) на 18 зон, кордони яких утворюють плоскі кути $0, 10, 20 \dots 90 \dots 180^\circ$ із віссю симетрії світильника). Якщо ж сила світла не може уважатися постійною в межах крупних десятиградусних зон, то під час розрахунку світлового потоку необхідно брати зони значно менших розмірів (наприклад, через 5° і навіть через 2°). Для будь-якої кінцевої зони простору,

що лежать між плоскими кутами α_1 та α_2 , світловий потік відповідно до рівняння (4.41) становить:

$$\Phi_{\alpha_1-\alpha_2} = 2\pi I_{\alpha_{CP}} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = 2\pi I_{\alpha_{CP}} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = I_{\alpha_{CP}} \omega_{\alpha_1 \alpha_2} \quad (4.28)$$

Загальний світловий потік Φ світильника дорівнює сумі зональних потоків. Значення $I_{\alpha_{CP}}$ в обчисленнях приймаються для середини кожної зони (тобто в разі десятиградусних зон для напрямків $\alpha = 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ і т.д.), а значення тілесних кутів розраховані та зведені до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Зональні тілесні кути за $\Delta\alpha = 10^\circ$

Зони кутів, α	Напрямок, що відповідає середині зони, α_{CP}	ω, cp	Напрямок, що відповідає середині зони, α_{CP}	Зони кутів, α
0-10°	5°	0,095	175°	170-180
10-20	15	0,283	165	160-170
20-30	25	0,463	155	150-160
30-40	35	0,638	145	140-150
40-50	45	0,774	135	130-140
50-60	55	0,879	125	120-130
60-70	65	0,993	115	110-120
70-80	75	1,058	105	100-110
80-90	85	1,091	95	90-100

На рис. 4.20 зображений також спосіб графічного обчислення світлового потоку СП за допомогою діаграми Руссо. Із цією метою в лівій частині графіка КСС відкладаються за віссю абсцис відрізки, що дорівнюють (у тому ж масштабі) значенням сили світла приладу під відповідними кутами. Із точок перетину кола з радіусом r і векторів сили світла I_α під кутами α опускаються перпендикуляри mm_1 на вісь приладу, і на продовженнях цих прямих відкладаються відрізки, що дорівнюють I_α . Відповідно до виразів (4.42) і (4.39) елементарний потік $d\Phi$ у тілесному куті, що характеризується малим кутом $d\alpha$, рівний:

$$d\Phi = \frac{2\pi dS}{r}, \quad (4.29)$$

де dS - площа фігури, заштрихованої на рис. 4.20.

Повний потік Φ визначиться площею S фігури ADEFC, яку можна знайти за допомогою планіметра або обчислити приблизно.

На відміну від діаграми Руссо, площа, обмежена кривою наростання зональних світлових потоків, не має фізичного сенсу. Крива (рис. 4.21) дозволяє наочно судити про розподіл у просторі світлового потоку приладу. Побудова кривої починається з обчислення зонального світлового потоку $\Phi_{\alpha_1-\alpha_2} (\Delta\Phi_1)$ для першої зони простору, обмеженої плоскими кутами α , що дорівнюють, наприклад, 0 і α_1 .

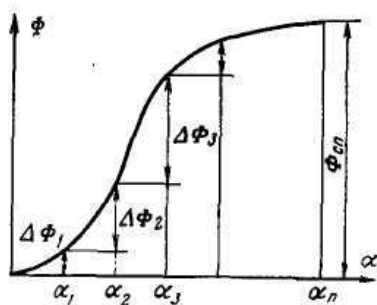


Рис. 4.21 –
Крива наростання
світлових потоків

Отримані значення $\Phi_{0-\alpha_1}$ відкладаються в обраному масштабі на графіку $\Phi = f(\alpha)$ у прямокутних координатах під кутом α_1 . Під кутом α_2 відкладається сума зональних потоків $\Phi_{0-\alpha_1} + \Phi_{\alpha_1-\alpha_2} = \Phi_{0-\alpha_2}$, під кутом α_3 - значення $\Phi_{0-\alpha_1} + \Phi_{\alpha_1-\alpha_2} = \Phi_{0-\alpha_2}$, і т.д. Остання ордината на графіці в точці $a_{II} = a_u$ (a_u - повний кут випромінювання СП) дає значення повного світлового потоку $\Phi_{СП}$.

Розрахунок світлового потоку за відомим світлорозподілом СП з двома площинами симетрії здійснюється на основі уявлення про просторові кутові зони у вигляді апельсинових часточок або аркуш розгорненої книги. Такі зони виходять після поділу простору сімейством вісьових поздовжніх площин (рис. 4.22).

Сила світла в кожному напрямку $I_{\alpha\gamma}$ характеризується кутами α і γ . Найчастіше повний світловий потік визначається подвійним інтегруванням у межах кутів α від $-\pi$ до $+\pi$ і кутів γ від $-\pi/2$ до $+\pi/2$:

$$\Phi = \int \int_{\alpha \gamma} I_{\alpha\gamma} \cos \alpha d\alpha d\gamma. \quad (4.30)$$

Зазвичай цей подвійний інтеграл не береться, оскільки функція $I_{\alpha\gamma}$ має досить складний вигляд, а її математичне вираження здебільшого відсутнє. Тому віднайдення світлового потоку зводиться до підсумовування кінцевих величин, що визначаються для тілесних кутів ω , обмежених у просторі площинами α_1 і α_2 , і напрямками γ_1 і γ_2 (рис. 4.22):

$$\omega \approx (\sin \gamma_2 - \sin \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{\pi}{180^\circ} \quad (4.31)$$

де співмножник $\frac{\pi}{180^\circ}$ уведений для переведення значень кута α з градусів у радіани.

Достатньо висока точність розрахунків забезпечується розбиванням простору на зональні тілесні кути, які характеризуються $\Delta\alpha = 10^\circ$ і $\Delta\gamma = 10^\circ$. Знайдені для такого випадку значення наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Зональні тілесні кути при $\Delta\alpha = 10^\circ$ і $\Delta\gamma = 10^\circ$

Зона кутів	Тілесний кут ω , ср	Зона кутів	Тілесний кут ω , ср	Зона кутів	Тілесний кут ω , ср
0-10°	0,0303	30-40	0,0249	60-70	0,0129
10-20	0,0294	40-50	0,0215	70-80	0,0079
20-30	0,0276	50-60	0,0174	80-90	0,0027

Для пошуку світлового потоку в одній півсфері простору в зазвичай потрібно мати значення сили світла в 324 напрямках (18X18). У зв'язку з відсутністю такої кількості даних, з метою спрощення завдання висовують наступні припущення: а) фотометричне тіло світильника має дві площини симетрії; б) криві сили світла у всіх подовжніх площинах взаємоподібні (відрізняються лише масштабом).

У цьому випадку потік усередині двогранного кута 10° між вісьовими подовжніми площинами $\alpha = -5^\circ$ і $\alpha = +5^\circ$.

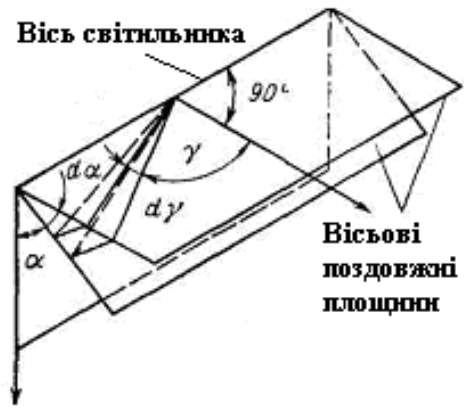


Рис 4.22 – Вісьові подовжні площини світильників і відповідні кути (до розрахунку світлового потоку СП з двома площинами симетрії)

$$\Phi_{-5\div+5} = 2(\omega_{0\div10}I_5 + \omega_{10\div20}I_{15} + \dots + \omega_{80\div90}I_{85}) = 2 \sum_{\gamma=0}^{90^\circ} \omega_{\gamma1\div\gamma2} I_{\frac{\gamma1+\gamma2}{2}}. \quad (4.32)$$

Множник 2 враховує симетрію світлорозподілу відносно поперечної площини.

Форма КСС світильників у поздовжній площині характеризується коефіцієнтом k_f , що дорівнює відношенню знайденого значення світлового потоку до значення вісьової сили світла світильника

$$k_i = \frac{\Phi_{-5\div+5}}{I_o} = \frac{2 \sum_{\gamma=0}^{90^\circ} \omega_{\gamma1\div\gamma2} I_{\frac{\gamma1+\gamma2}{2}}}{I_o} \quad (4.33)$$

Висунуте вище припущення щодо подібності всіх КСС у різних поздовжніх вісьових площинах рівноцінне припущенню постійності значення k_f для всіх інтервалів α . Тому для будь-якого інтервалу α потік знайдеться як похідна k_f на силу світла I_α у поперечній площині під кутом α до вертикальної вісі світильника.

Повний світловий потік світильника в нижній півсфері дорівнює сумі потоків у двограних тілесних кутах по обидва боки від поздовжньої площини:

$$\Phi_{\cup} = 2(k_f I_{\alpha=5^\circ} + k_f I_{\alpha=15^\circ} + k_f I_{\alpha=25^\circ} + \dots + k_f I_{\alpha=85^\circ}) = 2k_f \sum_{\alpha=5^\circ}^{85^\circ} I_\alpha. \quad (4.34)$$

Для випадків, коли в поздовжніх площинах світлорозподіл мало відрізняється від косінусного $k_f = 0,27$, а $\Phi_{\cup} = 0,54 \sum I_\alpha$ значення світлового потоку світильника у верхній півсфері можна знайти в подібний спосіб, однак, при цьому необхідно заново визначати значення k_f , яке відрізняється зазвичай від такого для нижньої півсфери.

Використання для розрахунку потоку, а отже, і ККД світильників описаного методу дозволяє значно підвищити точність отримуваних результатів порівняно з тими, які дає вживаний у низці випадків наближений розрахунок, коли потік становить суму похідних зональних коефіцієнтів (які визначають колосиметричні тілесні кути) і середніх для різних меридіональних площин значень сили світла I_α .

Відома низка спрощених формул для пошуку ККД світильників із ЛЛ за КСС у поздовжній і поперечній площинах. Для світильників прямого світла з концентрованим світлорозподілом у поперечній площині:

$$\eta = \frac{3\Phi_a + \Phi_{\bar{o}}}{4\sum \Phi_L} \quad (4.35)$$

Для світильників прямого та розсіяного світла:

$$\eta = \frac{4\Phi_a + 3\Phi_{\bar{o}}}{7\sum \Phi_L}, \quad (4.36)$$

де Φ_a і $\Phi_{\bar{o}}$ - світлові потоки колосиметричних світильників, за криві сили світла яких узяті відповідно криві в поперечній і поздовжній площинах даного світильника з ЛЛ;

$\sum \Phi_L$ - сумарний світловий потік ламп світильника.

Дані, що отримуються за описаним методом і спрощеними формулами, мають точність співпадання 5-6%.

4.3. Розрахунок світлових приладів із дзеркальними відбивачами

Розглянемо питання розрахунку дзеркальних безабераційних відбивачів деяких найбільш поширених СП із рівнояскравими джерелами світла простої форми.

Параболоїдні відбивачі прожекторних СП. Як уже неодноразово наголошувалося, оптичні системи прожекторних СП мають забезпечувати максимальну концентрацію світлового випромінювання в напрямку оптичної вісі СП. Параболоїдні відбивачі дозволяють якнайкраще вирішити це завдання. Визначившись із фокусною відстанню та кутом охоплення відбивача і знаючи математичний вираз $\gamma = \frac{\rho}{1 + \cos \varphi}$ поверхні другого

порядку – параболоїди обертання, знаходять координати профілю й геометричні розміри відбивача. Наступним етапом світлотехнічного розрахунку є розрахунок КСС параболоїдного відбивача з джерелом світла визначено форми, розмірів і відомим розподілом яскравості. У теорії розрахунку оптичних систем прожекторних СП детально розглянуто особливості роботи параболоїдних відбивачів із джерелами світла кульової, дискової, циліндрової та прямокутної форм, за рівномірного й нерівномірного розподілу яскравості, для безабераційних відбивачів і відбивачів із різними видами аберації.

Для простого випадку - параболоїдного відбивача з кульовим джерелом світла з рівнояскравим світним тілом - сила світла в будь-якому напрямку знаходиться за формулою (4.10), що виражає загальний принцип Максвелла. Для прожекторних СП є окремий випадок цього принципу - закон Манжена: вісьова сила світла прожектора дорівнює похідній яскравості L джерела світла, що перебуває у фокусі відбивача, на площу світлового отвору відбивача й коефіцієнті k , який враховує втрати світла в оптичній системі (на віддзеркалення, через екранування, у захисних стеклах і т.д.):

$$I_0 = kLS = kL\pi D^2/4 \quad (4.37)$$

де D - діаметр світлового отвору відбивача.

Для напрямків α , близьких до оптичної вісі, силу світла I_α можна записати у вигляді:

$$I_\alpha = kLSK_\alpha, \quad (4.38)$$

де K_α - коефіцієнт заповнення світлою частиною світлового отвору параболоїдного відбивача.

Таким чином, для розрахунку значень I_α необхідно використовувати методи відображення співмножників із формули (4.38), наведені в 4.2.

Для аналітичного або графічного (зонального) розрахунку сили світла прожектора необхідно розглянути структуру його світлового пучка. У нашому випадку пучок - безкінечна безліч ЕВ у вигляді колових конусів, усі вісі яких поєднані у просторі з оптичною віссю прожектора (рис. 4.23).

Половина кутового розміру ЕВ проміжної точки відбивача з координатами r, φ можна знайти через вираз:

$$\xi_\varphi \approx \frac{d}{2r} = \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (4.39)$$

де d - діаметр кульового світлого тіла; f - фокусна відстань параболоїда; r - радіус-вектор точки відбивача.

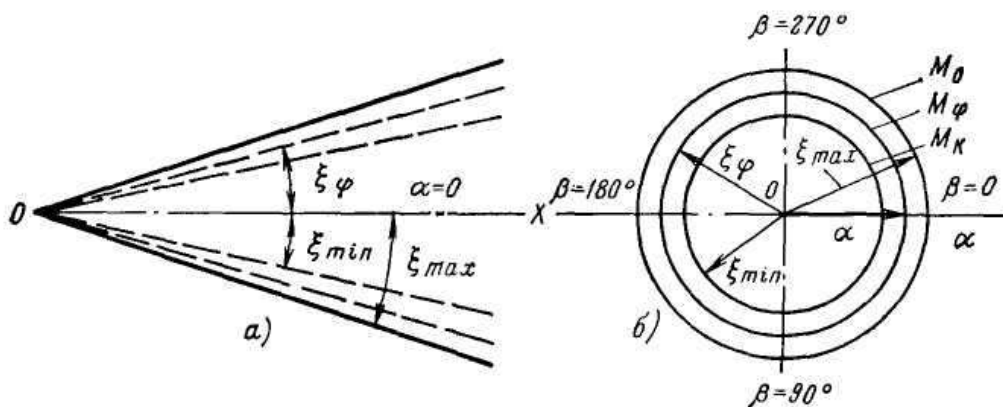


Рис. 4. 23 – Світловий пучок безабераційного параболоїдного відбивача з кульовим джерелом світла: a - перетин меридіональною площиною; b - перетин екваторіальною площиною

Для цього відбивача кутові розміри ЕВ ξ_φ для точки M_φ змінюються від найбільшого значення $\xi_{max} = d/2f$ для точки M_0 у вершині параболі на оптичну вісь до найменшого значення $\xi_{min} = \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi_{max}}{2}$ для крайньої точки

M_K відбивача. Безліч слідів усіх ЕВ для точок відбивача з координатами $\varphi = 0, \varphi, \varphi_{\max}$ наведена на рис. 4.23.

Під час аналітичного розрахунку розглядається світловий пучок від усього відбивача. При цьому для напрямків $0 < \alpha < \xi_{\min}$ вся поверхня відбивача світитися, і сила світла постійна. Для напрямків $\xi_{\min} < \alpha < \xi_{\max}$ зі збільшенням кута α відбувається згасання частини точок крайової зони відбивача внаслідок того, що ЕВ цих точок не перекривають напрямку α .

Світловий отвір зменшується в діаметрі, стягується до центру і при $\alpha > \xi_{\max}$ повністю перестає світитися. Таким чином, КСС має постійні значення («полицю») у межах кутів $0 < \alpha < \xi_{\min}$ і гілку, що спадає до нуля, у кутовому інтервалі $\xi_{\min} - \xi_{\max}$, при цьому закономірність зниження значень сили світла відповідає закономірності зменшення площі світної поверхні відбивача. Точки з координатою φ , що обмежують видиму світлу частину відбивача в напрямку α , мають ЕВ з кутовим розміром $\xi_{\varphi} = \alpha$. Ураховуючи це, пов'яжемо математично кутовий розмір ЕВ із координатою точки, що його утворює:

$$\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} = \left(\frac{d}{2\xi_{\varphi}f} - 1 \right) = \left(\frac{\xi_{\max}}{\xi_{\min}} - 1 \right). \quad (4.40)$$

Ураховуючи, що $\alpha = \varphi$ і $\xi_{\min} < \alpha < \xi_{\max}$ можна записати:

$$\alpha = m\xi_{\max}, \quad (4.41)$$

де значення m змінюється від 1 до $\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2}$;

$$I_{\alpha} = 4\pi\rho Lf^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (4.42)$$

або з урахуванням (4.40) і (4.41):

$$I_{\alpha} = 4\pi\rho Lf^2 \left(\frac{1}{m} - 1 \right). \quad (4.43)$$

За цією остаточною формулою можна розрахувати значення сили світла безабераційного параболоїдного відбивача з кульовим рівнояскравим джерелом. Для умовного приладу з одиничними значеннями всіх параметрів ρ, L і f вираз (4.43) максимально спрощується:

$$I'_{\alpha} = 4\pi \left(\frac{1}{m} - 1 \right). \quad (4.44)$$

Криві сили світла такого умовного прожектора наведені на рис. 4.24, при чому крива 1 наведена для плоского відбивача з кутом обхоплення

$\varphi_{max} = 60^\circ$, крива 2 - для відбивача з $\varphi_{max} = 90^\circ$, а крива 3 - для глибокого відбивача з кутом охоплення $\varphi_{max} = 120^\circ$. Як видно на рисунку, зі збільшенням кута охоплення різко зростає вісьова сила світла, і зменшується рівномірність розподілу світлового потоку усередині пучка - «полиця» постійних значень сили світла швидко згасає.

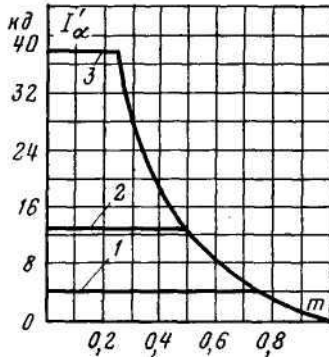


Рис. 4.24 – Криві сили світла умовного прожектора з параболоїдним відбивачем і кульовим джерелом

а кожна наступна зона з лінійними координатами точок на межах зон z_{i-1} і z_i :

$$S_{\varphi,C,O} = \pi(z_i^2 - z_{i-1}^2) = 4\pi f^2 \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_i}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{i-1}}{2} \right); \quad (4.45)$$

$$I_{O,\varphi} = \rho L S_{\varphi,\tilde{N},\hat{I}} = \rho L 4\pi f^2 \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_i}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{i-1}}{2} \right).$$

Кутові розміри ЕВ при кульовому джерелі для середніх точок зон складають:

$$\xi_i = \xi_{\Pi,i} = \arcsin \frac{d}{2f} \cos \frac{\varphi_{C\pi i}}{2} \approx \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi_{C\pi i}}{2}. \quad (4.46)$$

Фізична картина зміни світлої частини зони зі зміною кута α залишається такою самою ж, як і в розглянутого вище відбивача. Однак, через прийняте припущення щодо постійності ЕВ для всієї зони ця зона може бути або повністю світлою для $0 < \alpha < \xi_i$ (і тоді $K_\alpha = 1$), або повністю темною з моменту, коли α стане більшим ξ_i (і тоді $K_\alpha = 0$). Тому при прийнятому припущенні зональна КСС є прямокутником, основа якого дорівнює ξ_i , а висота - $I_{0,\varphi}$.

Графічне підсумовування зональних КСС (рис 4.25), за якого основи прямокутників сили світла подальших зон поєднуються з вершинами

(полицями) КСС попередніх зон, відбувається на графіку прямокутних координат I_α, α .

Точка з координатою ξ_{\max} в основі всієї піраміди зональних прямокутників і точкою з координатою ξ_{\min} на кінці полиці - вершини піраміди, які з'єднуються плавною кривою, що проходить через середини бічних сторін зональних прямокутників.

Роль кожної із зон відбивача у створенні вісьової сили світла СП характеризується коефіцієнтом світлової цінності зон G_φ :

$$G_\varphi = \frac{I_\varphi}{I_0} = \frac{\rho L_\varphi S_{\varphi, C, O}}{\rho \sum L_\varphi S_{\varphi, C, O}}, \quad (4.47)$$

де $S_{\varphi, C, O}$ - площа світлового отвору зони;

L_φ - габаритна яскравість джерела в напрямку φ середньої точки зони;

I_φ і I_0 - вісьові сили світла зони й усього відбивача.

При використанні рівнояскравого джерела світла

$$G_\varphi = \frac{S_{\varphi, C, O}}{S_{C, O}}, \quad (4.48)$$

де $S_{C, O}$ - площа світлового отвору всього відбивача.

Значення коефіцієнта світлової цінності зон за рівнояскравого джерела складають, наприклад, $G_\varphi = 8\%$ для зони $10 - 20^\circ$, $G_\varphi = 19\%$ для зони $30 - 40^\circ$, $G_\varphi = 34\%$ для крайової зони відбивача. Таким чином, дійсний фокус відбивача має лежати якомога ближче до зональних фокусів крайових зон, що мають найбільшу світлову цінність.

4.3.1. Пластинчасті відбивачі

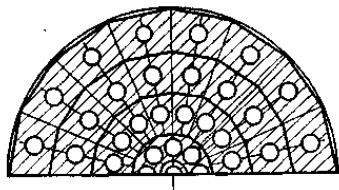


Рис. 4.26 – Вигляд параболоїдного пластинчастого відбивача з кульовим джерелом світла

Для пластинчастого дзеркального відбивача на параболоїдній основі (рис. 4.26) при розмірі пластин, якій перевищує розмір тіла рівнояскравого світного джерела вісьова сила світла дорівнює:

$$I_0 = (\rho N + 1) I_L, \quad (4.49)$$

де N - кількість пластин, I_L - сила світла джерела. У зв'язку з тим, що всі пластини створюють зображення в напрямку оптичної вісі, і в цьому ж напрямку світить саме джерело світла.

Коефіцієнт посилення пластинчастого параболоїдного відбивача з рівнояскравим джерелом світла:

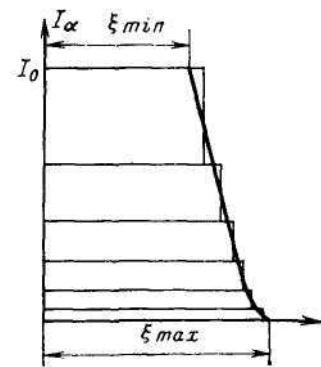


Рис. 4.25 – Підсумовування зональних КСС

$$K_y = (\rho N + 1) \quad (4.50)$$

Для підвищення K_y необхідно збільшувати кількість пластин, однак розмір кожної пластини не може бути меншим за розмір зображення тіла світного джерела.

Для забезпечення високої рівномірності розподілу світлового потоку в пучку СП намагаються отримати однакові кути випромінювання всіх зон відбивача у двох головних меридіональних площинах. Завдяки постійності напрямку нормалі до всіх точок (рис 4.12) плоскій пластини в меридіональній площині розворот $\Delta\alpha$ вісьових променів для крайніх точок зони дорівнює кутовому розміру $\Delta\varphi$ пластини в тій же площині. Повний кут випромінювання α_H для будь-якого елемента дорівнює сумі значень $\Delta\alpha$ і кутовому розміру ЕВ. Таким чином, для меридіональної площини:

$$2\alpha_H = \Delta\varphi + 2\xi. \quad (4.51)$$

В екваторіальній площині кут випромінювання пластини $2\alpha_{Э, H}$, і дорівнює:

$$2\alpha_{Э, H} \approx \frac{\omega}{r} + 2\xi_H = \Delta\psi \sin \varphi + 2\xi_H, \quad (4.52)$$

де ω - розмір пластини в сагітальному перетині;

r - радіус-вектор середньої точки пластини;

$\Delta\psi$ - кут між меридіональними площинами, що проходить через бічні кромки пластини.

За постійності кутів випромінювання всіх n зон i відбивача й тотожності при цьому кутів випромінювання кожної пластини в обох головних площинах за кульового джерела світла:

$$2\alpha_H = 2\alpha_{Э, H} = \Delta\varphi_i + \frac{d}{f} \cos^2 \frac{\varphi_{i, CP}}{2} = \Delta\psi_i \sin \varphi_i + \frac{d}{f} \cos^2 \frac{\varphi_{i, CP}}{2}. \quad (4.53)$$

За обраного заздалегідь діаметра D (або φ_{\max}) і фокусної відстані f відбивача для визначення кількості зон пластинчастого відбивача за допомогою $2\alpha_H$ у спосіб послідовних наближень знаходять шукані значення $\Delta\varphi_i$ та $\Delta\varphi_{i, CP}$. При цьому приймають для кожної зони однакові кутові розміри пластин $\Delta\varphi_i = \Delta\psi_i$.

Після добору кутових розмірів $\Delta\varphi_i$ та $\Delta\varphi_{i, CP}$ визначається кількість пластин у кожній зоні: $N_i = \frac{360^\circ}{\Delta\psi_i}$ і загальна кількість пластин всього відбивача:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i \quad (4.54)$$

Основним критерієм правильності добору кутових розмірів зон і плоских елементів є здобуття цілих чисел N_i .

Під час розрахунку КСС СП використовують підсумовування зональних кривих, побудованих із урахуванням міркувань, викладених нижче. Оскільки сила світла пластини $I_{\Pi} = \rho I_{\Pi}$ в усіх напрямках, із яких видне повне зображення поверхні світного джерела, пошук площі поверхні пластини, що виглядає світлою, і коефіцієнта заповнення не обов'язковий. У цих напрямках за рівнояскравого джерела сила світла постійна. У межах кутів дії крайового ефекту, коли на пластині залишається та частина зображення джерела світла, яка постійно зменшується зі збільшенням кутів спостереження:

$$I_{\alpha} = k_{m\alpha} I_0, \quad (4.55)$$

де $k_{m\alpha}$ - коефіцієнт, що визначає зміну площі світлої частини на краю пластини:

$$k_{m\alpha} = S_m / S_{\Pi}, \quad (4.56)$$

S_m - площа проекції неповного зображення;

S_{Π} - площа проекції тіла світного джерела в напрямку відповідної точки пластини.

Крайовий ефект можна визначити, розглядаючи пластину як прямокутну діафрагму (рис. 4.61), уздовж або впоперек якої проходить світне тіло.

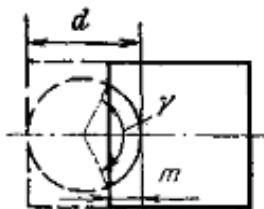


Рис. 4.27 – Зміна світлої частини на краю пластини

Для кульового джерела закон зміни світлої частини на краю пластини характеризуватиметься зміною площі S_m сегмента заввишки m і центральним кутом γ :

$$S_m = \frac{d^2}{8} (\gamma - \sin \gamma);$$

$$\gamma = 2 \arccos(1 - 2m/d); \quad (4.57)$$

$$\text{де } S_{\Pi} = \frac{\pi d^2}{2}, k_m = \frac{1}{2\pi} (\gamma - \sin \gamma).$$

Зміна значень $k_m = f(m)$ може розглядатися як відносна зміна значень сили світла від максимального значення I_0 до нуля в межах кутів від $\alpha_{i-1} - \xi_{i-1}$ до $\alpha_{i-1} + \xi_{i-1}$ для нижнього краю меридіонального перетину пластини і від $\alpha_i - \xi_i$ до $\alpha_i + \xi_i$ - для верхнього її краю. Це стосується й бічних країв пластини.

На рис. 4.28 зображена отримана графічним підсумовуванням КСС пластинчатого параболоїда. На відміну від кривих (рис 4.25) для суцільного параболоїда, усі зональні криві (зони 1-3) пластинчатого СП мають однакові розміри основ, які зменшується зі зростанням кута φ ширину й полиці кривої, що збільшується, для кожної наступної зони. Це підтверджує більшу рівномірність розподілу світлового потоку в пучках цієї групи СП і значне наближення її до світильників, ніж у СП прожекторного класу.

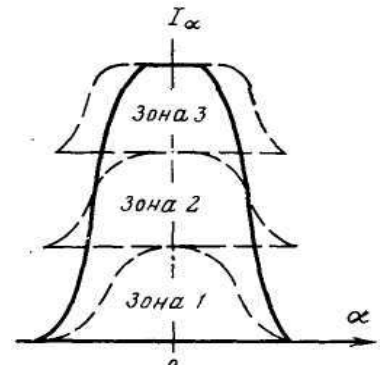


Рис. 4.28 – Крива сили світла пластинчатого відбивача

4.3.2. Параболоциліндричні відбивачі

Ця група відбивачів прожекторних СП призначена для отримання неколосиметричних віялоподібних світлових пучків, кутовий розмір яких у двох взаємоперпендикулярних площинах значно різниться (наприклад, $2 \times 10^\circ$ у поперечній площині та $2 \times 40^\circ$ в поздовжній).

Параболо-циліндричні відбивачі характеризують параметри висоти (поперечник), довжини, визначеної за довжиною фокальної лінії (геометричним місцем фокусів профільних парабол на поздовжній вісі), і плоского кута охоплення в поперечній ($2\varphi_{\max}$) і поздовжній ($2\psi_{\max}$) площинах.

Параболо-циліндричний відбивач працює в поперечній площині як параболоїд у меридіональному перетині і в головній поздовжній площині - як плоске дзеркало. Звідси витікають методи визначення профілю та розрахунку КСС, подібні до описаних вище.

Розгляд структури пучка таких СП показує, що в меридіональному перетині всі вісьові промені ЕВ мають кутовий розворот $\Delta\alpha = 0$, а в екваторіальних площинах - $2\Delta\beta = 2\psi_{\max}$. Це означає, що поверхня параболо-циліндричного відбивача зображується на площині α, β областю слідів вісьових променів із указаними кутовими розмірами, тобто прямою лінією ($\alpha = 0$), що складається з низки відрізків різної довжини. При цьому найбільший відрізок β_{\max} відповідатиме головною подовжньою – фокальній площині ($\varphi = 0$), а найменший - крайовій екваторіальній площині ($\varphi = \varphi_{\max}$). Кутові розміри ЕО для циліндрового світлого тіла діаметром d і довжиною l на подовжній вісі відбивача складають відповідно в поперечній (меридіональна) (ξ) і в головній поздовжній (ξ_{II}) площинах із урахуванням проектного скорочення видимого розміру (довжини) циліндричного світлого тіла для різних точок відбивача в перетині подовжньою площиною.

$$\xi = \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cos \psi;$$

$$\xi_{\Pi} = \frac{l}{2f} \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cos^2 \psi. \quad (4.58)$$

Зональне відображення розглянутого випадку наведене на рис. 4.29.

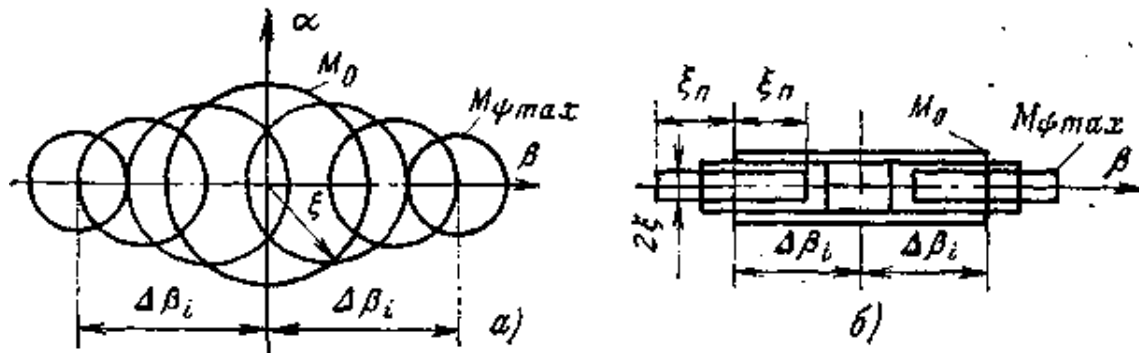


Рис. 4.29 – Зональне віддзеркалення параболо-циліндричного відбивача для кульового (а) і циліндрового (б) світних тіл

У напрямках, близьких до оптичної вісі, світла частина відбивача має прямокутну форму з висотою, що дорівнює висоті H відбивача в поперечній площині, із довжиною, що дорівнює видимому розміру світного тіла із заданого напрямку β (до тих кутів β , починаючи із яких діє крайовий ефект). Звідси витікає, що для рівнояскравого світного циліндра розташованого уздовж вісі відбивача, сила світла під кутом $\alpha = 0$.

$$I_0 = \rho L H d. \quad (4.59)$$

Зміна значень сили світла під різними кутами, тобто КСС, будується та має такий же вигляд, як і в параболоїдного відбивача в поперечній площині і у плоского дзеркала в подовжній площині. При цьому розмір основи КСС у поперечній площині має кут ξ_{\max} (розмір ЕО j для точки відбивача з $\varphi = 0$), кутова ширина верхньої полиці - ξ_{\min} (розмір ЕО для крайньої точки відбивача з $\varphi = \varphi_{\max}$), а висота всієї трапеції, форму якої має КСС у поперечній площині, дорівнює I_0 .

4.3.3. Дзеркальні відбивачі світильників

Дзеркальні відбивачі світильників, що перерозподіляють світловий потік джерел світла в межах значно більших кутів випромінювання, ніж прожекторні СП, відповідно створюють значно меншу концентрацію випромінювання і зазвичай мають під різними кутами розмір світлої частини менший за світловий отвір. Формуючи різний необхідний світлорозподіл, дзеркальні відбивачі отримують профільні криві, які підкоряються різноманітним законам зміни їхніх геометричних параметрів.

Усі елементи поверхні дзеркальних відбивачів орієнтовані у просторі напрямками нормалей до цих елементів у їхніх центральних точках.

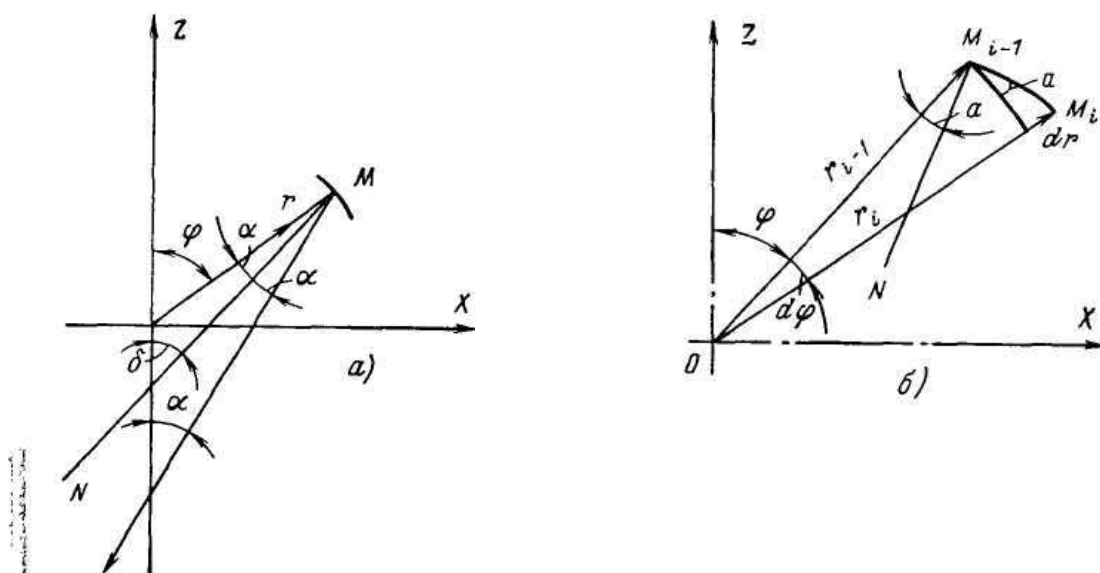


Рис. 4.30 – Побудова поверхні дзеркальних відбивачів: а - для розрахунку кутів α і δ ; б - кінцевий приріст радіус-вектора дзеркальної поверхні

Між напрямком нормалі до точки дзеркальної поверхні й напрямками упадного в задану точку М (рис. 4.30, а) променя світла від джерела й відбитого променя є чітка залежність, що виражається наступним чином:

$$\alpha = \frac{\varphi \mp \alpha}{2}; \delta = \frac{\varphi \pm \alpha}{2}. \quad (4.60)$$

Перші знаки в цих формулах належать до схем А і Б ходу упадних і відбитих променів (див. гл. 3, рис. 3.18), другі знаки - до схем В і Г (для яких кут α має негативний знак).

Знання залежності між напрямками упадних і відбитих променів дозволяє знайти форму поверхні дзеркального відбивача, що визначаються напрямками нормалей у кожній точці цієї поверхні.

Якщо для СП прожекторного класу залежність між кутами φ і α завжди чітко відома ($\varphi = \text{var}$, $\alpha = \text{const}$), то для світильників вона завжди різна й визначається необхідним світлорозподілом і параметрами джерела світла, розміри, форма й розподіл яскравості якого мають бути враховані під час побудови поверхні відбивача, тобто при його прямому оптичному розрахунку. Для проведення такого аналітичного розрахунку зазвичай потрібно мати рівняння, яке пов'язує значення радіус-вектора кожної точки М поверхні відбивача з кутами φ і ψ , що координують упадний промінь у внутрішній області відбивача, і кутами α і β , що визначають положення відбитого променя в зовнішній області.

Знайдені загальні диференціальні рівняння дзеркальної поверхні відбивачів світильників дозволяють розрахувати як несиметричні, так і симетричні прилади. Для випадку колосиметричної дзеркальної поверхні, коли

$$\frac{dr}{r} = \frac{\sin(\varphi - \alpha)d\varphi}{1 + \cos(\varphi - \alpha)} = \operatorname{tg} \frac{(\varphi - \alpha)}{2} d\varphi, \quad (4.61)$$

де dr і $d\varphi$ - безкінечно малі прирости радіус-вектора початкової точки безкінечно малої ділянки профільною кривою відбивача й кута φ , який її орієнтує (рис. 4.30, б).

Ураховуючи, що $\varphi - \alpha = 2a$, і переходячи до кінцевих приростів у разі, коли $\Delta\varphi = 10^\circ$, тобто 0,17 рад, отримаємо:

$$\lg r_i = \lg r_{i-1} + 0,076 \operatorname{tg} a_{CP}, \quad (4.62)$$

де $a_{CP} = \frac{\varphi_{CP} - \alpha_{CP}}{2}$ - кут падіння променя на середню точку

десятиградусної зони відбивача.

Дзеркальна поверхня може бути утворена не лише внаслідок обертання довкола оптичної вісі профільних кривих, які отримують за допомогою рівняння (4.68), але й набору з тороїдних, параболоїдних зон та ін. При використанні параболоїдних зон, кожна з яких розгорнута у просторі під певним кутом α :

$$r_i = r_{i-1} \frac{1 + \cos(\varphi_{i-1} - \alpha_i)}{1 + \cos(\varphi_i - \alpha_i)}. \quad (4.63)$$

Усі ці рівняння дзеркальної поверхні отримані лише для вісьових променів джерел світла, тому без віднайдення залежності між кутами, які орієнтують упадні та відображені промені, так званої функції необхідного ходу променів, визначеної з урахуванням форми й розмірів ЕВ, прямо скористатися цими рівняннями для точної побудови необхідної поверхні дзеркального відбивача не можна. Таким чином, найважливішим завданням прямого розрахунку дзеркального відбивача світильника є віднайдення функції необхідного ходу променів, яке забезпечить отримання заданого світлорозподілення за цього джерела світла.

Простий і найбільш наочний спосіб віднайдення функції необхідного ходу променів заснований на балансі необхідних і фактично відбитих світлових потоків, виходячи з припущення про точкову крихту світного тіла. За цим способом у потрібній КСС, яка має бути здійснена світильником, будують криву наростання світлових потоків (рис. 4.31, крива 1) за кутами α зовнішнього простору (при цьому із значень сили світла світильника заздалегідь віднімають значення сили світла самої лампи в цих же напрямках). Потім, використовуючи дані про КСС лампи, будують криву наростання упадних на відбивач світлових потоків за кутами φ внутрішньої області світильника (крива 2, рис. 4.31).

При цьому всі значення потоків для останньої кривої множать на коефіцієнт віддзеркалення ρ дзеркальної поверхні.

Наявність двох указаних кривих наростання, що містять однакові сумарні

значення світлового потоку, дозволяє визначити, у яку зону кутів α має бути спрямований світловий потік φ , що впав на цю зону, тобто визначити функцію $\alpha(\varphi)$.

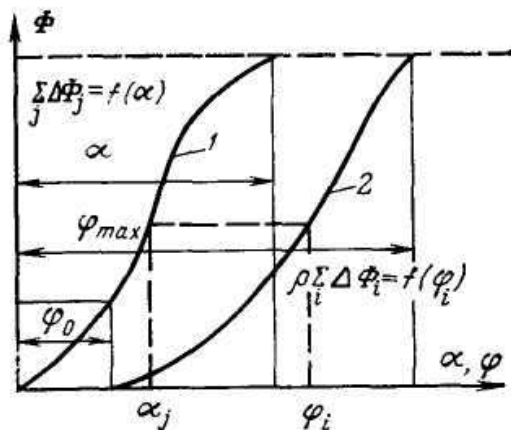


Рис. 4.31 – Визначення функції необхідного ходу променів за балансом світлових потоків

розрахунку профілю дає прийнятні результати без багатократних виправлень профілю за суцільних кульових світних тіл малого розміру.

Складність коректування відбивача, знайденого виходячи з припущення про точкову крихту джерела, пов'язана з необхідністю виправлення всього профілю його поверхні.

Мінімальні часткові коректування профілю (або навіть відсутність необхідності в них) мають місце за такої ефективної методики побудови відбивача, за якої необхідна КСС набирається (заповнюється) поступово зональними КСС (або у низці випадків зональними потоками), при цьому одночасно йде розрахунок координат профілю цих же зон. Віднайдення профілю зон відбивача базується на обраних для цієї зони напрямках вісьових променів EB і розвороті $\Delta\alpha$ цих променів поверхнею зони, що обумовлюють світлий вигляд площини поверхні зони в цьому напрямку, а, отже, і значення сили світла зони відбивача. Зіставлення необхідної КСС із зональною (або з декількома зональними кривими сусідніх зон) дозволяє здійснювати поступове та часткове коректування профілю малої кількості зон.

Таким чином, при поступовому заповненні необхідної КСС зональними кривими функція необхідного ходу променів знаходиться не для відбивача в цілому, а для кожної зони послідовно, одночасно з розрахунком її профілю. Збіги суми сили світла окремих зон відбивача в кожному напрямку з потрібною в цьому напрямку силою світла світильника отримують за допомогою методу послідовних наближень, варіюючи розворот вісьових променів $\Delta\alpha$ або змінюючи орієнтацію у просторі всієї зони (наприклад, на параболоїдну).

Спосіб заповнення необхідної КСС зональними кривими має важливе значення для розрахунку відбивачів і значною мірою визначає його результуючу форму. Найуживанішими засобами є «стикування» й

«накладання» зональних кривих.

При стикуванні зональних кривих (рис. 4.32) напрямок відбитого променя від крайньої точки попередньої зони і напрямок відбитого променя від першої точки подальшої зони збігаються.

Поверхня відбивача в цьому випадку виходить пивною і гладкою, кути α відбитих променів безперервно зростають (у схемі променів А ходу, рис. 3.18) або зменшуються (у схемі променів Б ходу). Повний розворот вісьових променів відбивачем (від першої зони до останньої) дорівнює сумі кутових розворотів кожної зони ($\Delta\alpha_n = \sum \Delta\alpha_i$). Заповнення методом «стикування» тим простіше, чим менше зональних кривих доводиться підсумовувати. Коли розмір ЕВ $2\xi_i$, - значно менший за розворот вісьових променів зони (показник концентрації $K \geq 1$), складаються всього дві зональні криві, при $K < 0,5$ розрахунок значно важчий, оскільки доводиться оперувати одразу більш ніж з чотирма зональними кривими.

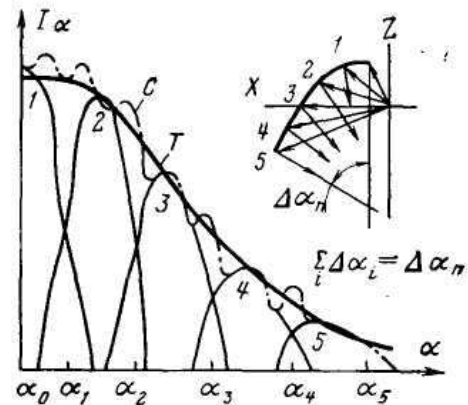


Рис. 4.32 – Заповнення необхідної КСС (Т) методом стикування зональних світлових потоків кривих (1-5). Буквою С позначена сумарна розрахункова КСС

При накладанні зональних кривих у напрямку відбитих променів різних зон вони перекривають одна одну, у цьому випадку $\sum \Delta\alpha_i > \Delta\alpha_n$. Відбивач за такого методу побудови має або плавну хвилясту поверхню (рис. 4.33) із зонами, що мають різні знаки кривизни (якщо напрямки відбитих променів крайньої точки попередньої зони й першої точки наступної зони збігаються), або набираються з оптично незалежних зон, які працюють кожна у своєму діапазоні кутів α (рис. 4.34).

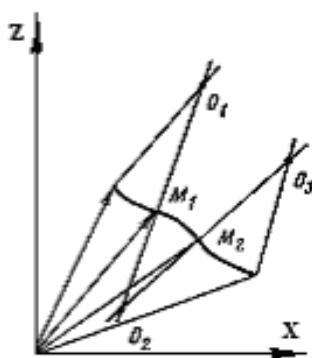


Рис. 4.33 – Хвиляста профільна крива дзеркального відбивача світильника: $O_1 - O_3$ - центри кривизни, $M_1 - M_3$ - точки сполучення

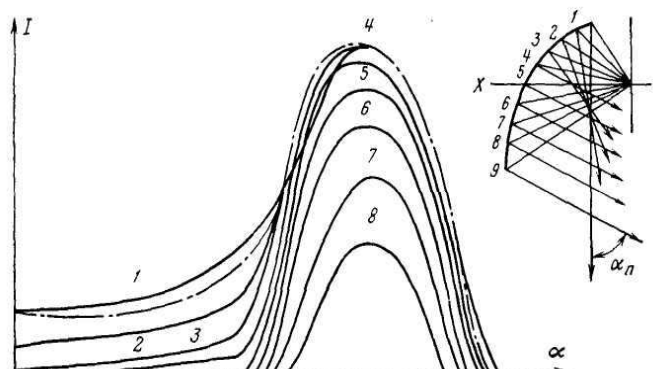


Рис. 4.34 – Заповнення способом накладання зональних кривих

Лише в окремому випадку, коли зони посиляють і паралельні пучки променів, тобто коли вісьові промені ЕВ різних зон збігаються і $\Delta\alpha = 0$, при накладанні зональних кривих виходить гладка рівна відбивана поверхня.

Порівнюючи розглянуті засоби заповнення потрібною КСС, необхідно відзначити низку світлотехнічних переваг методу «накладання». Ці переваги пов'язані з тим, що при накладанні кривих необхідні значення сили світла створюються внаслідок сумарної дії (особливо в напрямку максимуму) чотирьох-п'яти зон, тоді як при стикуванні - лише однієї-двох зон. При випадковому расфокусуванні або неточному виготовленні профілів відбивачів, отриманих методом накладання зональних кривих, забезпечують значно більший збіг розрахункових і реальних КСС, оскільки кутові зсуви деяких зональних кривих не чинять помітного впливу на результуючий світлорозподіл, як це буває під час побудови відбивача методом стикування.

У той же час, за винятком варіанта відбивача (рис 4.34), із технологічних міркувань переважають гладкі рівні поверхні, отримувані стикуванням зональних КСС.

При розробці дзеркальних світильників із концентрованими і глибокими КСС доцільно близьку до оптичної вісі кутову область найбільших значень сили світла перекрити зональними кривими декількох перших зон відбивача (верхніх) із найбільшими розмірами ЕВ. Область максимальних сил світла світильників з напівширокою та широкою кривими раціонально заповнювати декількома нижніми зонами відбивача, уключаючи крайову.

4.4. Метод світлових потоків

Розрахунок зональних КСС найменш складний при розробці світильників із джерелами світла, які мають суцільні світні тіла великого розміру (лампи ДРЛ та інші ГЛВД, ЛЛ). Із ускладненням форми і зменшенням коефіцієнта заповнення габариту світного тіла (наприклад, для низки типів ЛР) розрахунок світлої частини і, відповідно, зональних КСС значно ускладнюється. У цих випадках може бути використано метод світлових потоків.

Відповідно до методу світлових потоків за необхідною КСС світильника визначають значення необхідних зональних потоків $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Delta\Phi_A$, де 1, 2, ...A - номери зон тілесних кутів зовнішнього простору світильників. У наступній частині розрахунку відшуковується функція необхідного ходу променів $\alpha(\varphi)$. Із цією метою напрямки вісьових променів ЕВ обираються таким чином, щоб значення світлових потоків, що потрапили від різних зон φ відбивача в одну і ту ж зону А зовнішнього простору, у сумі, можна було порівняти зі значенням потрібного в цій же зоні потоку $\Delta\Phi_A$. Добір напрямів вісьових променів і розрахунок розподілу потоку за зонами відбувається за допомогою слідів ЕВ різних зон відбивача і гномонічних сіток. Гномонічні сітки є проекціями просторової сфери на площини, перпендикулярні напрямку відбитого променя, який розглядається.

При цьому на слід ЕВ наноситься розподіл світлового потоку за цим елементарним відображенням. Для того, щоб розподіл дзеркально відбитого потоку відповідав знайденим необхідним значенням $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \dots, \Phi_A$, має дотримуватися рівність:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta f_{11} + \Delta f_{12} + \Delta f_{13} + \dots + \Delta f_{1\varphi} = \Delta \Phi_1; \\ \Delta f_{21} + \Delta f_{22} + \Delta f_{23} + \dots + \Delta f_{2\varphi} = \Delta \Phi_2; \\ \\ \Delta f_{A1} + \Delta f_{A2} + \Delta f_{A3} + \dots + \Delta f_{A\varphi} = \Delta \Phi_A. \end{array} \right\}, \quad (4.64)$$

де $\Delta f_{A\varphi}$ - частка потоку, що впав на зону відбивача, спрямованого після віддзеркалення в зовнішню зону А.

Розрахунок координат профілю відбивача можна здійснити за будь-яким із існуючих рівнянь дзеркальної поверхні. Розрахунок найбільш простий, якщо припустити, що профіль дзеркальної поверхні складається із низки зв'язаних в одну лінію параболоїдних відрізків (для яких $\Delta\alpha = 0$) із загальним фокусом у світловому центрі (4.63). При цьому достатня для практики точність розрахунку забезпечується за умови, що кут між граничними вісьовими променями, відбитими від двох сусідніх зон, не перевищує $2-3^\circ$ (а у низці випадків і 5°). Розрахунок профілю зон провадиться паралельно із пошуком функції $\alpha(\varphi)$, і проведення додаткових перевірочних розрахунків не вимагається.

Розглянутий метод заснований на умові балансу світлових потоків, спрямованих джерелом світла на відбивач і відбитих останнім у зовнішній простір. Дійсно, розгляд системи рівнянь (4.64) показує, що сума потоків $\Delta f_{A\varphi}$ у вертикальних стовпчиках дорівнює значенню потоку джерела, яке впало на зону φ відбивача (помноженого на ρ). У той же час сума потоків $\Delta f_{A\varphi}$ у горизонтальних рядках дає потік у кожній зоні А зовнішнього простору. Завдяки балансу світлових потоків забезпечується постійна можливість самоперевірки під час розрахунку.

Вирази (4.64) має чіткий фізичний сенс, його можна перетворити шляхом ділення на відповідний тілесний кут на рівняння для сил світла:

[illegible]

де $i_{A\omega}$ - сила світла, створювана цією зоною відбивача в напрямку А.

Остання система рівнянь відповідає положенням методу сил світла. Розгляд її показує, що підсумовування у стовпчиках не має жодного сенсу, оскільки не можна складати сили світла, спрямовані під різними кутами.

Важливими умовами, які мають бути виконані при розрахунку дзеркальних відбивачів світильників, є однократне віддзеркалення променів і відсутність пересічення відбитими променями колби лампи. Умова однократного відображення променів полягає в тому, щоб забезпечити відсутність багаторазових віддзеркалень світлового потоку у світильнику, які знижують ККД останнього і змінюють світлорозподіл. Ця умова виконується, якщо для будь-якої точки відбивача максимальний кут виходу випромінювання α_{\max} менший за певне значення, що залежить від розташування точки віддзеркалення:

$$\alpha_{\max} \leq \arctg \frac{R+x}{h+z}, \quad (4.66)$$

де R і h - геометричні параметри відбивача (рис. 4.35); x і z - координати точки віддзеркалення.

Умова непересікання відбитими променями колби лампи також спрямована на підвищення ККД дзеркального світильника завдяки відсутності втрат світлового потоку, поглиненого й розсіяного колбою лампи, а також виключення перегрівання джерела світла відбитим випромінюванням.

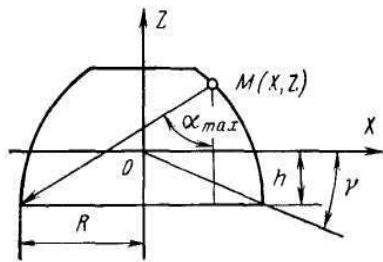


Рис. 4.35 – Умова однократного відображення променів

У низці випадків виконати ці дві умови, особливо для верхніх зон відбивача, при використанні джерел світла з великими світними тілами важко. Тоді доводиться або йти на збільшення габаритів відбивачів за рахунок вибору великих значень первісного радіус-вектора r_0 , або застосовувати побудову профілю відбивача на основі використання різних систем ходу відбитих променів, або допускати часткове потрапляння відбитого світлового потоку від верхніх зон на лампу і протилежний бік відбивача, ураховуючи це під час розрахунку.

Орієнтовне значення R з виразу (4.66) умови однократного віддзеркалення променів можна знайти до побудови всієї поверхні відбивача на основі приюлизного виразу:

$$R = r_0 k_r \cos(\varphi_{\max} - 90^\circ) = r_0 k_r \cos \gamma_C, \quad (4.67)$$

де $k_r = r_{\varphi_{\max}} / r_0$ - коефіцієнт відносного збільшення первинного радіус-вектора;

γ_C - захисний кут світильника (відносно світлового центра).

Значення k_r залежать від необхідного світлорозподілу, яке здійснюється поверхнею відбивача. Для низки концентрованих і глибоких КСС дзеркальних світильників із ЛР, що умовно характеризуються максимальним коефіцієнтом посилення $K_{y_{\max}}$, розраховані значення k_r за різних кутів

охоплення φ_{\max} або захисних кутів світильників γ_c відносно світлового центра (рис. 4.36).

Вихідними даними для світлотехнічного проектування дзеркального світильника є світлотехнічні вимоги і, перш за все, заданий світло-розподіл, ККД, мінімальні захисні кути γ . Разом із цим до необхідних вихідних даних потрібно віднести максимальні габарити відбивача (якщо такі обмежуються) і його коефіцієнт віддзеркалення ρ , повні технічні характеристики джерела світла ($P, U, \Phi, I_d(\alpha), L(\varphi)$ форму та розміри колби і світного тіла, висоту світлового центра).

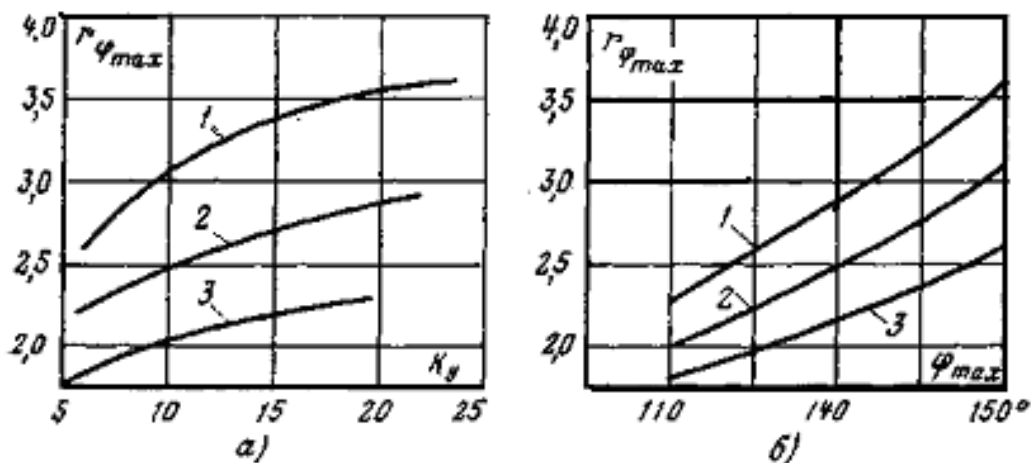


Рис. 4.36 – Залежності $r_{\varphi_{\max}}$ від K_y і φ_{\max} :

- а) 1 - $\varphi_{\max} = 130^\circ$, 2 - $\varphi_{\max} = 120^\circ$; 3 - $\varphi_{\max} = 110^\circ$; 1 - концентрована КСС з $K_y = 12$; 2 - концентрована крива з $K_y = 7$, 3 - глибока крива з $K_y = 4$

Для проведення самого розрахунку обираються початкові параметри відбивача r_0 , φ_0 і φ_{\max} (або $\gamma = \varphi_{\max} - 90^\circ$). При цьому необхідно мати на увазі, що від вибору значень r_0 і φ_{\max} сильно залежать остаточні розміри відбивача. Мінімальні значення r_0 і φ_{\max} визначаються з комплексу світлотехнічних, теплотехнічних і експлуатаційних вимог.

Після вибору початкових параметрів знаходиться масштабний коефіцієнт A для заданої КСС:

$$A = \frac{\Phi_{\alpha_z} + \rho \Phi_{\varphi}}{\Phi'_{\text{св}}}, \quad (4.68)$$

де Φ_{α_z} - потік лампи в межах заданого кута випромінювання;

$\Phi'_{\text{св}}$ - потік, що відповідає заданій КСС світильника в умовних одиницях;

$\rho \Phi_{\varphi}$ - потік, що посиляється відбивачем світильника (розраховується за потоком лампи, який падає на відбивач у межах кута $(\varphi_{\max} - \varphi_0)$).

Для ЛР із цією метою можна скористатися КСС лампи, але для ламп ДРЛ, що мають великі розміри і перебувають поблизу відбивача, користуватися біля внутрішньої області світильника поняттям сили світла не можна, і

світловий потік необхідно розраховувати за яскравістю й розмірами світлого тіла. Наступним підготовчим етапом розрахунку є віднайдення тих необхідних значень сили світла I_α , які мають забезпечуватися лише за допомогою відбивача без урахування прямого випромінювання лампи:

$$I_\alpha = (I_{CB} - I_L)_\alpha. \quad (4.69)$$

При цьому враховуються лише позитивні значення цих різниць, оскільки в тих напрямках, у яких сила світла лампи від всього світильника, більше за потрібну, відбивач працювати не має.

Далі обираються кутові розміри зон $\Delta\varphi$ (зазвичай $\Delta\varphi = 5^\circ$; рідше 10°), визначається порядок заповнення потрібною від відбивача КСС (яку зі схем ходу променів застосувати) послідовно від початкових зон в горловини до крайової зони відбивача. Після цього проводиться безпосередній розрахунок першої зони: визначаються розміри ЕВ, обираються значення $\Delta\alpha_1$, знаходиться функція необхідного ходу променів для першої зони (значення $\varphi_0, \alpha_0, \varphi_1, \alpha_1$), розраховується за одним із рівнянь дзеркальна поверхня r_1 , після чого відшуковується зональна КСС цієї зони та наноситься на викреслену у прямокутних координатах необхідну КСС від відбивача. Далі проводиться оцінка збігу необхідної та зональної кривої, і при перевищенні зональної кривої необхідних значень $\Delta\alpha_1$ збільшується (у протилежному випадку, навпаки, $\Delta\alpha_1$ зменшується), розраховується нове значення r_1 , і знову знаходиться зональна крива, яка знову зіставляється з необхідною. Досягши задовільного збігу, розрахунок першої зони закінчується, і починається розрахунок наступної зони відбивача.

Знаючи основні параметри дзеркального відбивача ($\varphi_0, \varphi_{max}, \rho$), можна розрахувати ККД світильника ще до побудови профілю відбивача:

$$\eta = \frac{\Phi_{CB}}{\Phi_L} = \frac{m_1\Phi_1 + \rho m\Phi_L}{\Phi_L} = m_1 + \rho m, \quad (4.70)$$

де m - частка потоку лампи Φ_L , що падає на відбивач;

m_1 - частка потоку лампи, що прямо виходить крізь отвір відбивача.

Вираз (4.73) для ККД дзеркального світильника наведено, виходячи з припущення про виконання умов однократного віддзеркалення променів і пересічення відбитими променями колби лампи, однорідності поверхні відбивача ($\rho = const$ для будь-яких зон і ділянок) і повної втрати частини потоку $m_0\Phi_L$, що падає на горловину відбивача.

Із (4.70) видно, що значення ККД дзеркального світильника багато в чому визначається коефіцієнтом віддзеркалення та не залежить від форми і площі поверхні (при виконанні зазначених вище умов). Крім того, ККД збільшується при зменшенні частки потоку m_0 , що падає на горловину відбивача в межах кута φ_0 , і при збільшенні частки потоку m_1 , що виходить прямо, без відбивань. У той же час зростання коефіцієнта m_1 означає зниження кута охоплення φ_{max} і зменшення перерозподіленого оптичною

системою потоку, тобто зниження коефіцієнта використання оптичної системи.

Наслідком цього є зменшення коефіцієнтів посилення й загальне зниження коефіцієнта використання освітлювальної установки.

4.5. Світильники із дзеркальними циліндровими відбивачами й лінійними джерелами світла

Особливе місце серед дзеркальних СП посідають світильники із дзеркальними циліндровими відбивачами та лінійними джерелами світла, що мають переважно дві площини симетрії. Дія таких відбивачів аналогічна описаній вище роботі параболо-циліндричних оптичних систем, із тією лише різницею, що заповнення зображенням світлового отвору світильника за висотою H (у поперечній площині) змінюється під різними кутами залежно від форми необхідної КСС.

Розрахунок дзеркального циліндрового відбивача проводиться за тією ж схемою, що й розрахунок профілю колосиметричного відбивача. В основу розрахунку кладуть необхідні КСС у поперечній площині, знаходять функцію необхідного ходу променів і за одним із рівнянь для колосиметричної дзеркальної поверхні розраховують координати профілю відбивача в поперечній площині. При цьому розрахунок зональної КСС циліндричного відбивача, який значно простіший за аналогічний розрахунок колосиметричного світильника, ведеться окремо для головних поперечної та поздовжньої площин.

Зональна КСС у поперечній площині розраховується на підставі аналізу меридіонального перетину зонального відображення. Розмір відрізка зони циліндрового світлого відбивача в цьому напрямку відзначається коефіцієнтом заповнення K_α , який дорівнює:

$$K_\alpha = e_\alpha / \Delta\alpha, \quad (4.71)$$

де e_α - кут між вісьовими променями двох ЕВ, що торкаються точки, яка відповідає напрямку α зліва і справа (рис 4.37).

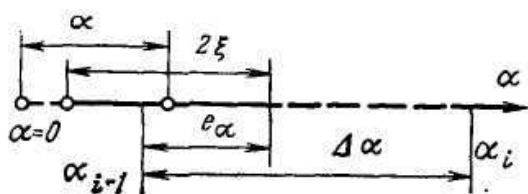


Рис. 4.37 – К розрахунку кута e_α

На рисунку 4.37 на прямій кутів α відкладений відрізок, який відображає область слідів вісьових променів зони (його довжина дорівнює кількості одноградусних комірок N , зайнятих вісьовими променями). Відрізок із

кутовим розміром 2ξ для середньої точки зони відображає слід ЕВ. Кут e_α відзначається співпадінням центра відрізка з точкою, яка відповідає напрямку α .

Кут θ_α при цьому дорівнює частині відрізка 2ξ , який перекриває відрізок $\Delta\alpha$ (або кількість одноградусних вічок n_α області слідів вісьових променів ЕВ, які перекривають напрямок α):

$$K_\alpha = n_\alpha / N \quad (4.72)$$

Сила світла циліндрового відбивача в напрямку α :

$$I_\alpha = \rho L_\varphi S_{\varphi i} K_\alpha \cos \sigma_\alpha, \quad (4.73)$$

де $S_{\varphi i} = H_{\varphi i} l$ - площа поверхні зони;

$\sigma_\alpha = \delta_\alpha \pm \alpha$ - кут проектного скорочення площі поверхні зони;

l - довжина лампи;

L_φ - яскравість джерела світла в напрямку φ до зони.

Підсумовування зональних КСС дає КСС у поперечній площині. Зональну КСС у поздовжній площині знаходять на основі аналізу роботи плоского дзеркала з урахуванням крайового ефекту, що дозволяє знайти коефіцієнт заповнення зони K_β за її довжиною:

$$K_\beta = \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \xi_n} \right) \quad (4.75)$$

Сила світла циліндрового дзеркального відбивача в поздовжній площині дорівнює силі світла за напрямом лінії пересікання поперечною та поздовжньою площинами, помноженій на значення K_β і $\cos \beta$:

$$I_\beta = \rho L S_\varphi K_\alpha \cos \sigma_\alpha K_\beta \cos \beta \quad (4.76)$$

Дзеркальні циліндрові відбивачі розраховуються для роботи з такими нерівнояскравими лінійними джерелами світла, як ксенонові лампи, галогенні ЛР, НЛВТ, а також із ЛЛ, які мають чимале світне тіло, із практично рівномірним розподілом яскравості в поздовжнім перерізі. Остання обставина дозволяє під час розрахунку таких відбивачів із ЛЛ застосовувати простий метод заповнення потрібною кривою коефіцієнтів посилення.

Під час розрахунку дзеркального циліндрового відбивача з ЛЛ від необхідної КСС переходять до кривої коефіцієнтів посилення сили світла діленням вихідної сили світла світильника I_α на силу світла лампи I_L ($I_L = \Phi_L / 9,2$):

$$K_{y,\alpha} = I_\alpha / I_L. \quad (4.77)$$

Для того, щоб можна було збалансувати світлові потоки - необхідний для отримання заданої КСС (або кривої коефіцієнтів посилення) від світильника з обраними параметрами потрібно поділити обчислені значення коефіцієнтів посилення $K_{y,\alpha}$ на масштабний коефіцієнт A :

$$A = \frac{\sum_0^{\alpha_m} (K_y) \Delta \alpha}{\rho(\varphi_{\max} - \varphi_0) + \alpha_m}, \quad (4.78)$$

де K_y - середнє значення ординат кривої коефіцієнтів посилення сили світла для інтервалу кутів $\Delta \alpha$;

α_m - кут, у межах якого світловий потік лампи виходить із відбивача ($\alpha_m = 180^\circ - \varphi_{\max}$).

Коефіцієнт A визначає необхідну кількість ламп цієї потужності для створення необхідного світлового потоку.

Таким чином, необхідні значення коефіцієнтів посилення та силу світла дорівнюють:

$$K_{\alpha, T} = K_{y, \alpha} / A, \quad I_{\alpha, T} = K_{\alpha, T} I_{\alpha}. \quad (6.79)$$

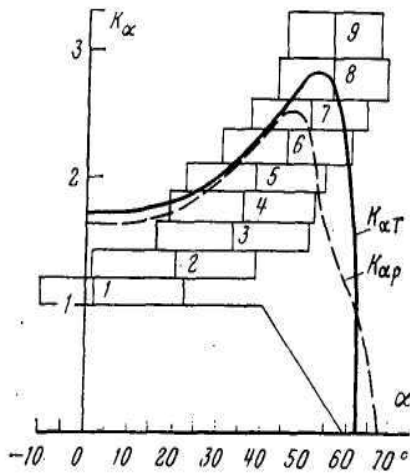


Рис. 4.38 – Крива коефіцієнтів підсилення: $K_{\alpha, T}$ - необхідна, $K_{\alpha, P}$ - розрахункова; 1-9 - зональні значення

Побудову кривої необхідних коефіцієнтів посилення $K_{\alpha, T} = f(\alpha)$ слід виконувати у прямокутних координатах (рис. 4.38). Горизонтальна лінія $K = 1$ на цьому малюнку відповідає силі світла самої лампи.

Поверхня дзеркальних відбивачів із ЛЛ обирається лише гладкою. Найменша ширина поздовжнього розміру відбивача, що забезпечує глибоку КСС, виходить за його параболоциліндричної форми. У цьому випадку ширина відбивача:

$$H = \frac{d}{\rho} (K_y - 1) + d_L, \quad (4.79)$$

де d_L - діаметр ЛЛ; K_y - коефіцієнт посилення СП.

Світильники з напівширокими та широкими КСС із заданими значеннями K_y отримують за допомогою параболічних профільних кривих, вісь яких збігається з напрямком I_{α} . Заповнення останньої частини необхідної КСС здійснюється за допомогою зон, що забезпечують різні необхідні напрямки світлового потоку. Найпростіше для побудови координат повного профілю дзеркальної циліндрової поверхні відбивача скористатися методом набору відрізків софусовальних парабол і формулою (4.63).

Основна частина розрахунку зводиться до обчислення початкових і кінцевих радіус-векторів цих зон і визначення нахилу вісей парабол до оптичної вісі відбивача (тобто визначення функції необхідного ходу променів). Паралельно знаходяться значення K_{y_i} зон відбивача, які відкладаються на графіку й поступово заповнюють криву необхідних $K_{\alpha, T}$.

Початкові параметри r_0 і φ_0 обираються з урахуванням умов однократного віддзеркалення променів і відсутності перетинання відбитими променями колби лампи. Ці умови задовольняються для дзеркальних світильників із ЛЛ за виконання співвідношень:

$$\arcsin \frac{d}{2r_0} \geq \frac{\varphi_0 \mp \alpha_0}{2} \quad \text{и} \quad r > \frac{d_{\text{Л}}}{2 \sin \frac{\varphi \mp \alpha}{2}}. \quad (4.80)$$

Знак «-» належить до схем А і Б ходу променів, «+» - до схем В і Г.

Найрозповсюдженіше значення кута φ_0 для випадків забезпечення КСС типів А, Б і В (рис. 2.4 сімейство кривих сили світла), отриманих за допомогою перерахунку ефективних КСС промислових колосиметричних світильників, складають: $\varphi_0 = 25 - 35^\circ$ - для відбивачів світильників із кривою А; $\varphi_0 = 35 - 45^\circ$ - для кривої Б і $\varphi_0 = 45 - 55^\circ$ - для кривої В.

Ураховуючи, що розподіл потоку ламп у просторі пропорційний плоским кутам φ в поздовжній площині, а також зважаючи на вираз (4.73), ККД дзеркального світильника з ЛЛ визначається за формулою:

$$\eta = \left[t - \frac{\varphi_0}{180^\circ} - \frac{\varphi_{\max}}{180^\circ} (t - \rho) \right] 100, \quad (4.81)$$

де $\varphi_{\max} = 90^\circ + \gamma_{\text{с}}$, $\gamma_{\text{с}}$ - захисний кут відносно світлового центра.

Кут розсіяння для початкової поштовхи першої зони визначається за формулою:

$$\xi_0 = \arcsin \frac{d_{\text{Е}}}{2r_0}. \quad (4.82)$$

Кут повороту вісі параболі першої зони дорівнює:

$$\alpha_1 = \alpha - \frac{\alpha_0}{2}, \quad (4.83)$$

при чому α_0 обирається виходячи з умов прямого виходу (за дотичною лампи) вісьового променя ЕВ початкової точки першої зони відбивача.

За відомими φ_0, r_0, α_1 знаходяться значення r_1 за формулою (4.63). Далі визначається $K_{\text{у}}$, відкладається на графіку $K_{\alpha, \text{Т}}$.

$$K_{\text{у}1} = \frac{r_1 \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - r_0 \sin(\varphi_0 - \alpha_1)}{d_{\text{Л}}} \rho. \quad (4.84)$$

Розмір ЕВ кінцевої точки першої зони:

$$\xi_1 = \arcsin \frac{d_{\text{Л}}}{2r_1}. \quad (4.85)$$

Ширина зональної кривої $K_{\text{у}i}$ дорівнює середньому значенню розмірів ЕВ для крайніх точок зони, тобто $(\xi_0 + \xi_1)/2$.

Послідовність побудови останніх зон відбивача залишається такою ж, при цьому відомими при розрахунку кожної наступної зони є параметри кінцевої точки попередньої зони.

У низці випадків розробки дзеркальних світильників із ЛЛ, коли є важливі обмеження поздовжнього розміру відбивачів, доводиться відступати від наведених вище вказівок про запобігання потрапляння відбитих променів назад на лампу й відбивач.

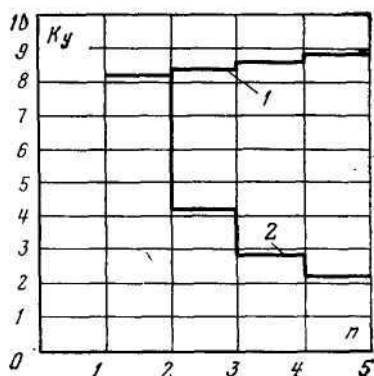


Рис. 4.39 – Залежність K_y світильника від кількості ЛЛ, установлених в одному дзеркальному відбивачі:

1 - відносно однієї лампи; 2 - відносно n ламп.

Необхідно відзначити, що проектування багатолампових дзеркальних світильників (а більшість світильників із ЛЛ через малу одиничну потужність багатолампові) доцільно проводити лише на основі використання окремих дзеркальних відбивачів для кожної лампи. Використання двох і більше ЛЛ в одному дзеркальному відбивачі призводить до втрат основних переваг дзеркальних світильників: виключається можливість потрібного перерозподілу потоку ламп у просторі, значно знижується ККД за рахунок багатократних віддзеркалень.

На рис. 4.39 наведені значення K_y світильника з одним дзеркальним відбивачем ($H/d_{\text{л}} = 10$, $\rho = 0,8$) при установці в нього n ЛЛ.

4.6. Розрахунок конструкції та світлових параметрів світлодіодного прожектора далекої дії

У роботах [2,9] детально розглянуто принципи розрахунку оптичних систем світлових приладів. Однак, приклади розрахунку оптичних систем стосуються традиційних систем і приладів, які використовують лампові джерела світла, чим і визначаються особливості конструкцій. Поява світлодіодних джерел світла призвела до розробки принципово нових конструкцій приладів, а також визначила особливості в розрахунках оптичних систем.

Нижче у якості прикладу нового конструкторського вирішення та розрахунку прожектора розглянута твердотіла повноохоплююча оптична система світлодіодного прожектора далекої дії [21].

4.6.1. Твердотіла повноохоплююча оптична система (ТПС) світлодіодного прожектора

Низкою авторів були запропоновані різні конструкції дзеркально-лінзових систем світлодіодних прожекторів, які промислового поширення не

набули й розглядаються як експериментальні зразки [22]. Більш простою, компактною й ефективною є наступна [23] (рис.4.40).

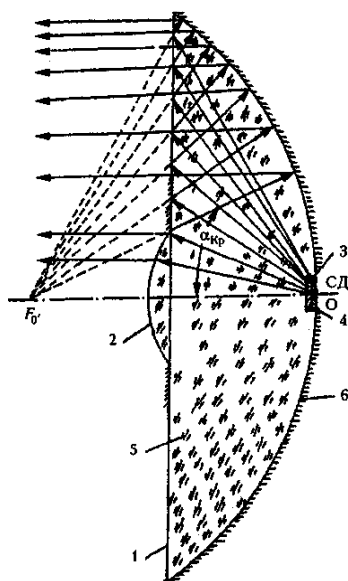


Рис. 4.40 – Твердотіла дзеркально-лінзова повноохоплююча система світлодіодного прожектора ТПС:

- 1 - прозора площина;
- 2 - центральна лінза;
- 3 - випромінюючий кристал;
- 4 - вершина відбивача;
- 5 - прозоре тіло;
- 6 - параболоїдний відбивач

Тут прозора плоска поверхня (1) прозорого тіла розташована посередині фокусної відстані основного параболоїдного відбивача (2) перпендикулярно його оптичній вісі. «Чіп» розташовується в недзеркалізованій ділянці вершини цього відбивача. Промені світла, що розходяться з «чіпа» (3) під кутами до оптичної вісі, що перевищують критичний кут повного внутрішнього відбиття, відбиваються від цієї поверхні, розходячись ніби з уявного віддзеркалення «чіпа» у плоскій поверхні (4), яка збігається з фокусом основного відбивача F . Тому, відбившись від нього, вони вільно виходять через прозору площину паралельно оптичній вісі.

Промені випромінювання «чіпа», що прилягають до оптичної вісі параболоїдного відбивача в межах критичного кута повного внутрішнього віддзеркалення прозорого тіла, охоплюються лінзою (5) коліматора і прямують нею уздовж оптичної вісі. Разом ці два компоненти випромінювання «чіпа» охоплюються плоским кутом в 141° півпростору. Останні 19° , випромінювання, що припадають на кут, падають на основний відбивач не з його фокусу й розсіюються. Щоб цьому запобігти, на їхньому шляху можна встановити додатковий кільцевий параболоїдний відбивач (5) (рис. 4.41) з фокусом, поєднаним із «чіпом». Віддзеркалення променів «чіпа» від нього також прямує уподовж оптичної вісі OZ .

Таким чином, усе випромінювання «чіпа» в півсфері концентруються уздовж загальної оптичної вісі оптичної системи прожектора [24].

Розрахунок параболоїдного відбивача, лінзи коліматора й допоміжного відбивача наведені в 4.6.2 - 4.6.4. Практичний інтерес становлять розрахунки окремих світлових параметрів цього прожектора див. 4.6.5 – 4.6.6.

4.6.2. Розрахунок параболоїдного відбивача ТПС

Геометричні параметри ТПС безпосередньо пов'язані з величиною його фокусної відстані. Вони включають кутові й лінійні розміри, а конкретно -

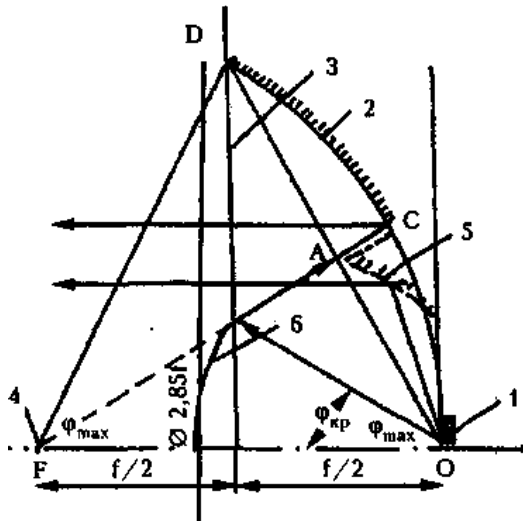


Рис. 4.41– Схема розрахунку параболоїдного відбивача ТПС:
 1 - «чіп»;
 2 - параболоїдний відбивач;
 3 - площина прозорого тіла;
 4 - фокус параболоїдного відбивача
 5 - додатковий кільцевий параболоїдний відбивач;
 6 - поверхня лінзи коліматора

габарити та кут охоплення. У зв'язку з принциповою схемою ТПС профіль його графоаналітичної побудови обмежений перпендикуляром до середини фокусної відстані. Одночасно він є перетином поверхні прозорого тіла.

Саме цей перпендикуляр обмежує і діаметр оптичної системи, і її розрахунок, який проводиться за відомою формулою параболы в полярній системі координат:

$$r_{\varphi} = \frac{2f}{1 + \cos \varphi}, \quad (4.86)$$

де φ - кут, що координує промінь, який падає з фокусу на відбивач;

r_{φ} - радіус-вектор, який визначається цим кутом.

Розрахунок проводиться до точки А (рис 4.41), де парабола перетинає згаданий перпендикуляр.

У таблиці 4.3 наведені радіус-вектори параболы з $\Delta\varphi = 10^\circ$. Кут охоплення легко розраховується геометрично, із урахуванням того, що трикутник FAO - рівнобедрений, а зазначений перпендикуляр ділить фокусну відстань навпіл. Цей кут складає $\varphi_{\max} = 70,5^\circ$, або в подвійному вираженні $2\varphi_{\max} = 141^\circ$.

Таблиця 4.3 Радіуси-вектори параболы

Град	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
r_{φ}	f	$1,01f$	$1,03f$	$1,07f$	$1,13f$	$1,17f$	$1,33f$	$1,38f$	$1,7f$	$2f$

Так само легко визначається діаметр відбивача:

$$D = 2,83f. \quad (4.87)$$

Слід зазначити, що зазвичай «чіп» випромінює у простір менше, ніж у півсферу, однак це обмеження не обов'язкове. У цьому випадку частина світлового потоку «чіпа» падає безпосередньо на відбивач, а не за схемою ТПС, і розсіюється. Це відбувається якраз у межах кута $180^\circ - 141^\circ = 39^\circ$. Тут є можливість використовувати й цю частину світлового потоку, установивши в межах трикутника OAC додатковий кільцевий параболоїдний відбивач із фокусом у «чіпі», тобто на вершині основного відбивача. При цьому основний відбивач працює поза критичним кутом повного внутрішнього

віддзеркалення. Усередині нього цю роль виконує центральна лінза коліматора, фокус якої поєднаний із «чіпом», а основна площа може збігатися з поверхнею прозорого тіла.

4.6.3. Розрахунок профілю центральної лінзи за допомогою твердотілої дзеркально-лінзової оптичної системи прожектора

Повноохоплююча оптична схема світлорозподільного оптичного приладу світлодіоду містить центральний елемент - лінзу, у фокусі якої розташовується «чіп». Проте її детальний розрахунок не проводився, виходячи з того, що промисловість уже опанувала СД із лінзовим куполом, який (за опублікованими даними) забезпечує вузькоспрямований світлорозподіл приладу. При цьому не наводилися певна методика й результати розрахунків. Тут є певна специфіка, пов'язана з тим, що:

- на відміну від звичайних лінз, ця обмежена повітряною середою лише з одного боку;
- кут охоплення нею «чіпа» має бути не менше (краще тотожним) граничного кута повного внутрішнього віддзеркалення матеріалу прозорого тіла запропонованої оптичної схеми;
- лінза має легко компонуватися з останньою частиною схеми.

Тому загальноприйнята формула для лінзи зі сферичними поверхнями в цьому випадку не може бути використана. Це зумовило зональний підхід до вирішення визначеного завдання. Його метою було віднайдення залежності нахилу i -ї зони поверхні лінзи до поздовжньої (перпендикулярної оптичній вісі) площини, тобто пошук функції $\gamma_i(\varphi_i)$, де γ_i - кут нахилу i -ї площини, а φ_i - середня координата i -ї зони. Іншими словами, розв'язання цієї задачі зводиться до графоаналітичної побудови профілю лінзи з подальшим перенесенням координат вузлових точок у підсумкову таблицю.

Використовуючи закон заломлення на межі середовища (із показником заломлення n) і повітря, після нескладних розрахунків була отримана шукана формула у вигляді:

$$\gamma_i = \arctg \frac{\sin \varphi_i}{n - \cos \varphi_i} + \varphi_i$$

У таблиці 4.4 наведені результати цих розрахунків для прозорих середовищ тіла з показниками заломлення у вигляді трьох значень: 1,42; 1,5; 1,6.

Таблиця 4.4 - Координати профілю лінзи (γ)

n/φ_i	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48,2	51,2
1,42	0	16,7	31,6	45	55,5	64,6	72,3	78,5	84,6	90	-	-
1,5	0	14,87	28,5	41	51,9	61,1	68,4	75	81,2	86,8	90	-
1,6	0	13,3	25,6	37,5	47,7	56,5	64,2	71,2	77,6	83,7	88,7	90

На рис. 4.42 наведені профілі лінзи (γ) у графічному вигляді.

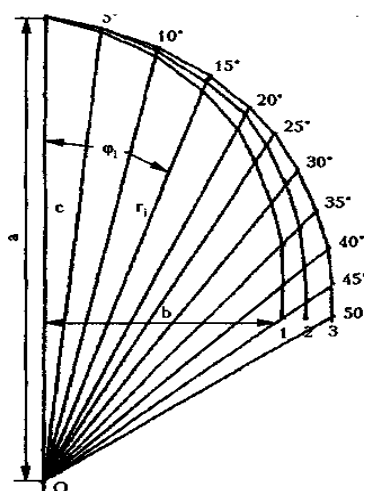


Рис. 4.42 – Розрахований профіль лінзи для різних коефіцієнтів її заломлення:
1 – $n = 1,42$; 2 – $n = 1,5$; 3 – $n = 1,6$

Відмінність між ними не настільки істотна, як можна було очікувати. Але в будь-якому разі наголошується на їхній принциповій відмінності від сферичної форми. Зняті з цих графіків функції координат (r_i, φ_i) вузлових точок профілів лінзи для вказаних показників заломлення їхнього матеріалу представлені в таблиці 4.5.

У розрахунках у вигляді фокусної відстані f прийнята лінія Oz Розрахунковий профіль лінзи далекий від сферичного й набагато ближчий до еліпсоїдного.

Таблиця 4.5 - Відносні координати профілю лінзи (r_i, φ_i)

n/φ_i	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	48,2	51,2
1,42	1	0,47	0,93	0,88	0,82	0,76	0,69	0,63	0,55	0,50	-	-
1,5	1	0,975	0,94	0,9	0,84	0,79	0,73	0,67	0,61	0,55	0,53	-
1,6	1	0,98	0,95	0,88	0,86	0,83	0,77	0,71	0,66	0,6	0,57	0,56

При розташуванні далекого фокусу лінзи в далекій від її вершини точці параметри еліпсоїда можна звести в таблиці 4.6 (з точністю до 3-4 %).

Таблиця 4.6 - Параметри профілю лінзи

n	b/a	c/a	e	f/a
1,42	0,56	0,77	0,81	1,77
1,5	0,62	0,75	0,76	1,75
1,6	0,69	0,74	0,71	1,74

Тут a і b - відповідно велика й мала піввісі еліпсоїда, c - міжфокусна відстань, e - ексцентриситет, f - фокусна відстань лінзи (від її вершини до джерела), n - коефіцієнт заломлення матеріалу лінзи.

Компонування розрахованої центральної лінзи з рештою елементів повноохоплювальної світлорозподільної системи вказує на їхню хорошу поєднуваність і можливість у низці випадків ($n > 1,42$) скоротити висоту лінзи над прозорою площиною за одночасного певного зменшення діаметра.

Для простого СД з вузькою спрямованістю (прожектор далекої дії) розрахований профіль куполу має забезпечити кращий (більш концентроване) світлорозподіл порівняно з традиційним сферичним.

4.6.4. Розрахунок ступінчастого профілю центральної лінзи ТПС

Розрахований профіль лінзи коліматора значно виступає за прозору площину, таким чином те, що його «втопило» у прозорому тілі, може виявитися небажаним або недостатнім. У такому випадку задовільним може виявитися додання цьому профілю ступінчастої форми, тим паче, що єдиним параметром указанного профілю є нахил зон профілю лінзи до повздовжньої площини. Також варто задатися постійністю висоти профілю над основою.

Найпростіше це можна зробити графічно, шляхом паралельного перенесення зональної прямої профілю лінзи на рівень висоти зони критичного кута повного внутрішнього віддзеркалення (рис. 4.43). Крім того, можна об'єднати декілька центральних зон, надавши їхньому профілю контуру дуги.

Ще доцільніше замінити крайові зони (практично половину радіусу лінзи) дзеркалізованою кільцевою ділянкою площини прозорого тіла, як це зображено на рисунку 4.44.

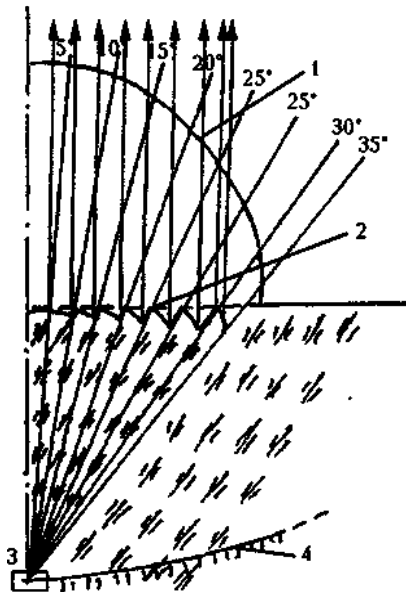


Рис. 4.43 – Трансформація гладкого контуру лінзи у ступінчастий: 1 - первинний контур лінзи; 2 - ступінчастий контур лінзи; 3 - світлодіод; 4 - параболоїдний відбивач

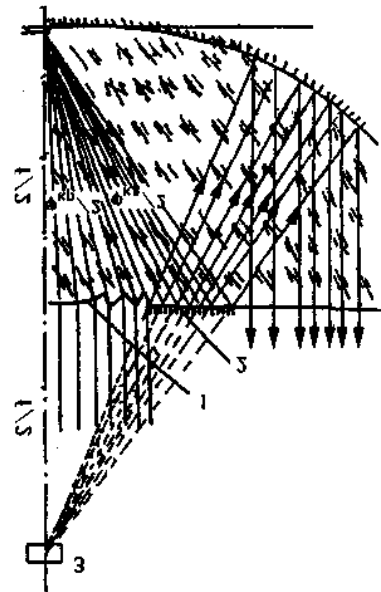


Рис. 4.44 – Лінза з допоміжним кільцевим відбивачем: 1 - центральна лінза; 2 - допоміжний кільцевий відбивач; 3 - уявне зображення СД

Останнім часом усе більшого поширення набувають мікрорастрові лінзи, які можуть вживатися й у цьому випадку.

4.6.5. Розрахунок світлових параметрів світлодіодного ТПС. Світла частина оптичної системи світлодіодного прожектора з різними видами ТПС

Світлою частиною оптичної системи називається сукупність точок активної поверхні світлового приладу, які виглядають світлими із заданого напрямку спостереження. Розміри та форма світлої частини, власне кажучи, залежать від напрямку спостереження. Для колосиметричної системи ця

залежність простіша, особливо за межами відстані повного свічення. У більш вужчому сенсі світла частина визначається спостереженням за оптичною віссю (для прожекторів із конічним світлорозподілом) або у фокальній площині (для прожекторів із віялоподібним світлорозподілом, зокрема, для прожекторів колового випромінювання).

Для прожекторів конічного випромінювання з ТПС світла частина принципово не відрізняється від світлої частини лінзового прожектора (рис. 4.45). Вона є світлим колом із темним кільцем, яке відповідає зоні параболоїдного відбивача, на яку не падають промені, що проходять у межах критичного кута повного внутрішнього віддзеркалення (за зовнішнім контуром) і діаметру центральної лінзи (за внутрішнім контуром).

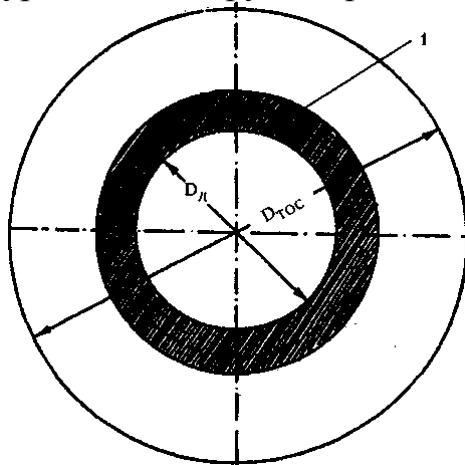


Рис. 4.45 – Вигляд світлової частини прожектора з ТПС із конічним світлорозподілом із боку оптичної вісі:

D_l - діаметр центральної лінзи;
 $D_{тос}$ - діаметр оптичної системи);
 1 - темне кільце.

Додатковий параболоїдний відбивач значно скорочує зовнішній розмір темного кільця (пунктирна лінія усередині темного кільця).

У прожекторі колового випромінювання світла частина оптичної системи при спостереженні з фокальної площини видається світлою смугою, розширеною в центральній частині, із двома темними проміжками над і під центральною частиною, викликаних тими ж причинами, що й темне кільце у світловому отворі прожектора з кінцевим світлорозподілом (рис. 4.46).

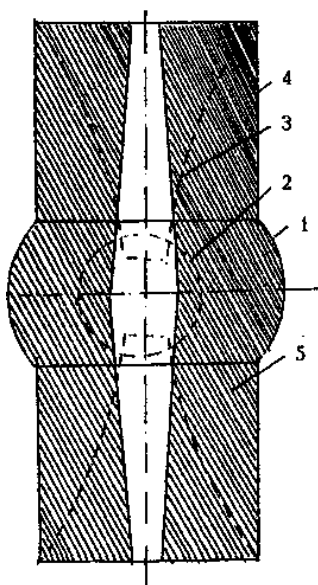


Рис. 4.46 – Світла частина прожектора колового випромінювання з ТПС:

1 - центральна оптична лінза;
 2 - джерело світла;
 3 - дзеркалізована параболоциліндрична поверхня;
 4 - прозора циліндрова поверхня;
 5 - прозоре тіло

На близьких відстанях наявність темного кільця створює незначні особливості у світлорозподілі й освітленості екрану; з відстані повного свічення його вплив незначний.

4.6.6. Розрахунок манженівської сили світла світлодіодного прожектора

Якщо нехтувати оптичними втратами деяких світлових параметрів ТПС з реальними СД, то вісьова сила світла такого прожектора дорівнює [9]:

$$I_o = LS,$$

де L - яскравість «чіпа»; S - площа його основного відбивача (якщо вважати, що лінза коліматора працює ідеально).

Якщо при цьому вважати «чіп» - майданчиком із розмірами 0,25x0,25 мм, який дифузійно випромінює в півсферу, то світловий потік від нього дорівнює:

$$\Phi = \pi L S_r.$$

У цьому випадку $L = \frac{\Phi}{\pi S_r},$

звідки $I_o = \frac{\Phi S}{\pi S_r}.$

У джерелах згадуються світлодіоди зі світловим потоком 20 лм, площа відбивача з фокусною відстанню 100 мм яких приблизно дорівнює 0,07м², таким чином розрахувавши площу «чіпа» $S_r = 0,25 \times 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 6,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, можна отримати манженівську силу світла такого прожектора у вигляді $I_o = 7 \cdot 10^6 \text{ кд}$.

Це орієнтовна величина для деяких ідеалізованих умов.

Іншим визначальним параметром прожекторів є відстань повного світіння, яка дорівнює:

$$L = R \operatorname{ctg} \frac{d}{2R},$$

де d – діаметр, що випромінює світло «чіпа», ($0,1 \text{ мм} = 10^{-7} \text{ м}$);

R - радіус відбивача (в цьому випадку він приблизно дорівнює радіусу світлового отвору $R = 0,15 \text{ м}$). Звідси $L = 450 \text{ м}$, тобто відстань повного світіння світлодіодного прожектора, добре юстированого, може складати сотні метрів.

При цьому ширина зони зворотних квадратів може складати тисячні частки градуса; те саме стосується й «полички» КСС. Не випадково (за літературними даними) відстань видимості світлодіодного світлосигнального прожектора складає декілька кілометрів.

Ще раз потрібно повторити, що ці оцінки належать до ідеалізованого випадку, який включає:

- ідеальну за виготовленням геометрію ТПС;
- повну відсутність будь-якого розфокусування.

Питання для самоперевірки

1. Які існують методи світлотехнічного розрахунку світлових приладів?
2. Метод елементарних відображень.
3. Характеристики елементарних відображень.
4. Опишіть особливості елементарних відображень, які створює безаберационний параболоїдний відбивач.
5. Методи пошуку розміру світлого отвору оптичної системи в певному напрямку.
6. Методи віднайдення ФСТ.
7. Опишіть принципи розрахунку сили світла оптичної системи СП за допомогою ЕВ.
8. Способи обчислення світлового потоку за кривими сили світла СП.
9. Опишіть принципи розрахунку параболоїдних прожекторних СП з допомогою методу елементарних відображень.
10. Опишіть принципи розрахунку параболоїдних пластинчастих відбивачів з допомогою методу елементарних відображень.
11. Опишіть принципи розрахунку параболо-циліндричних відбивачів за допомогою методу елементарних відображень.
12. Опишіть принципи розрахунку світильників із дзеркальними відбивачами за допомогою методу елементарних відображень.
13. Опишіть принципи розрахунку світильників із дзеркальними циліндричними відбивачами за допомогою методу елементарних відображень.
14. У якому випадку доцільно застосовувати метод світлових потоків?
15. Опишіть принцип розрахунку параболоїдного відбивача ТПС.
16. Опишіть принцип розрахунку профілю лінзи ТПС.
17. Опишіть принцип розрахунку світлових параметрів світлодіодного ТПС.
18. Опишіть принцип розрахунку сили світла світлодіодного прожектора.

Додаток А

Індекс	Клас СП	Підклас СП	Ступінь захисту СП
0			Немає захисту
1			Захищені від зовнішніх твердих предметів діаметром більше або рівним 50 мм
2	Пилонезахищені	Відкриті	Спеціальний захист від пилу відсутній; наявний захист від контакту із пальцями
		Перекриті	Спеціальний захист від пилу відсутній; проникнення пилу обмежене світлопрозорою оболонкою
3			Захищені від зовнішніх твердих предметів діаметром більше або рівним 2,5 мм
4			Захищені від зовнішніх твердих предметів діаметром більше або рівним 1 мм
5	Пилозахищені	Повністю пило- захищені	Захист від потрапляння пилу на струмовивідні частини та на колбу. Допускається незначне проникнення пилу. Повний захист персоналу від можливого контакту із пальцями
		Із обмеженим пилозахистом	Захист від потрапляння пилу на струмовивідні частини. Допускається незначне проникнення пилу. Повний захист персоналу від можливого контакту із пальцями
6	Пилонепроникні	Повністю пилонепроникні	Повний захист від пилу. Повний захист персоналу від можливого контакту із пальцями
		Із обмеженою пилонепроникністю	Повний захист від потрапляння пилу на струмовивідні частини. Повний захист персоналу від можливого контакту із пальцями
Індекс	Клас СП	Ступень захисту від води	
0	Водонезахисні	Захист відсутній	
2	Краплезахисні	Захист від крапель, які падають під кутом вертикалі 15°	
3	Дощезахисні	Захист від дощу, який падає під кутом до 60°	
4	Бризкозахисні	Захист від бризок, які потрапляють під будь-яким кутом	
5	Струмозахисні	Захист від струменів води, які падають під будь-яким кутом	
6	Хвилезахисні	Захист від впливу морської води	
7	Водонепроникні	Захист від потрапляння води при занурюванні на задані глибини на годину	
8	Герметичні	Захист від потрапляння води при занурюванні на задані глибини на необмежений час	

Додаток Б

Таблиця 1 - Типові КСС круглосиметричного СП

α , град	Г 1	Г 2	Г 3	К 1	К 2	К 3
0	503	670,7	894,2	1192	1583	2120
5	499,8	664,8	883,8	1173	1549	2062
10	490,2	647,5	852,5	1118	1449	1893
15	474,4	618,5	801,1	1026	1288	1595
20	452,7	579,5	731,2	902	1052	1261
25	425,1	530,2	643,8	750	810	832
30	392,1	471,4	541,3	547	515	249
35	354,1	404,7	439,9	380	196	0
40	311,7	330,9	301	174	0	
45	265,3	251,4	168,8	0		
50	215,5	167,3	32,6			
55	162,9	81,8	0			
60	108,3	0				
65	52,6					
70	0					

Таблиця 2 - Основні параметри ламп ДНаТ і ДРІ

Тип джерела	Ф, клм	Розміри лампи		Розміри світнього тіла	
		$D_{л}$, мм	$l_{л}$, мм	$D_{ож}$, мм	$l_{ож}$, мм
ДНаТ50	3,5	40	156	6	32
ДНаТ70	6,5	37	156	6	42
ДНаТ100	10	46	211	605	55
ДНаТ150	17	46	211	705	65
ДНаТ250	25	58	240	8,9	75
ДНаТ400	47	58	240	8,9	85
ДРІ 75	5,5	20	114	10	26
ДРІ 125	8,3	23	132	12	27
ДРІ 150	11	46	170	14	28
ДРІ 175	12	46	211	14	30
ДРІ 250	19	60	227	16	36,5
ДРІ 400	32	62	290	16,8	40
ДРІ 700	56	80	350	20	58
ДРІ 1000	90	176	390	22	86

Додаток В

Таблиця - КСС лампи ДНаТ в умовних одиницях

α	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	90
$I_{л.ум.}(\alpha)$	0	20	35	50	63	75	86	92	94	100	101

Таблиця Б.3 - КСС лампи ДРІ в умовних одиницях

α	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	90
$I_{л.ум.}(\alpha)$	0	0,48	2,83	4,32	20,1	49,2	78,4	95,2	100,7	102,9	104

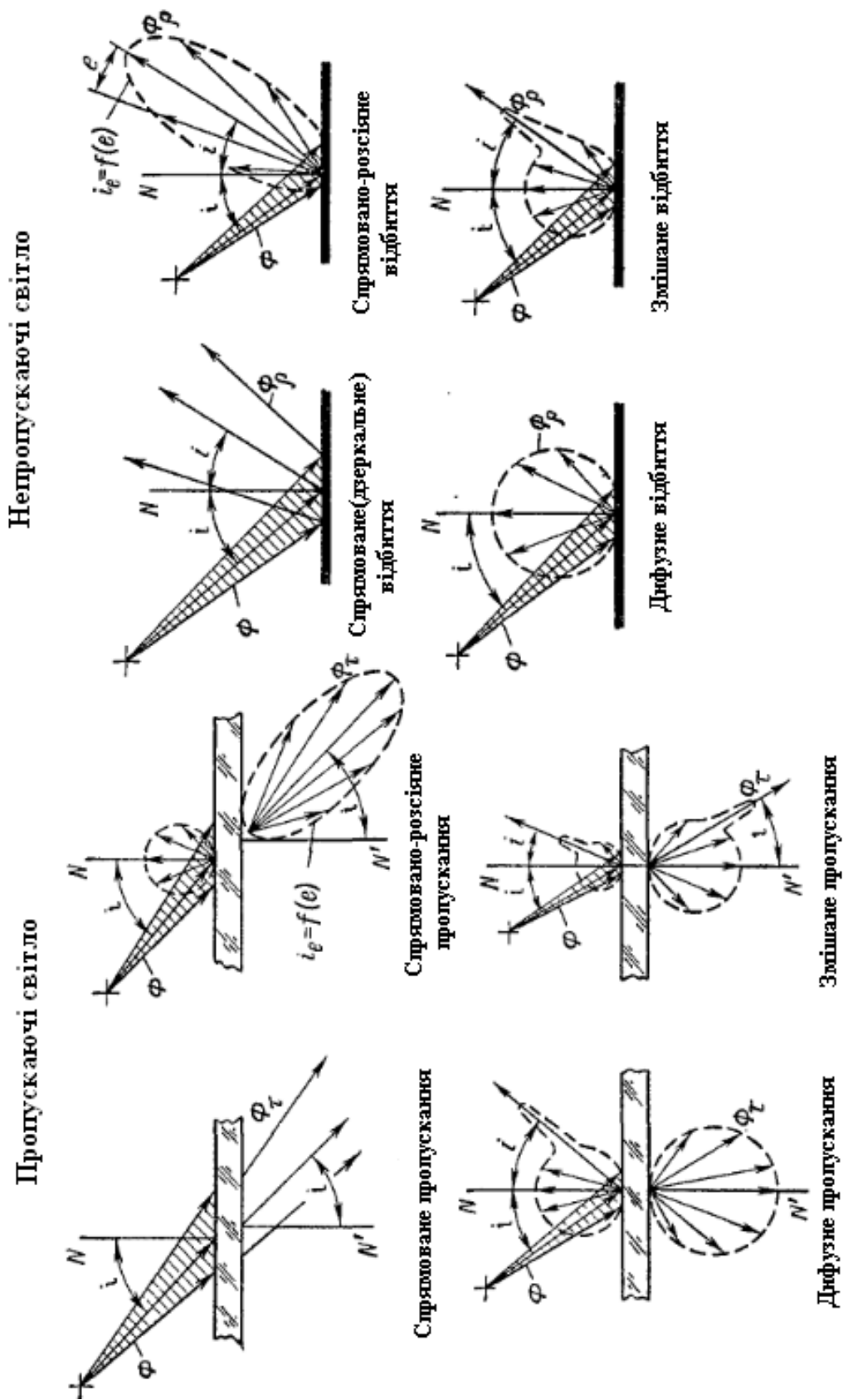


Рис.1 Класифікація світлотехнічних матеріалів

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Справочная книга по светотехнике / под общ. ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 972с.
2. Айзенберг Ю.Б. Световые приборы / Ю.Б. Айзенберг – М.: Энергия, 1980. – 380с.
3. Айзенберг Ю. Б. Что нужно знать о светильниках с люминесцентными лампами / Ю.Б. Айзенберг. – М.: Энергия, 1964. - 104 с.
4. Энергосбережение в освещении / Под общей ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 1999 г. – 264 с.: ил.
5. Пилипчик Р.В. Промышленное освещение: методико-справочное пособие / Р.В. Пилипчик, В.В.Щиренко, Р.Ю.Яремчук.: – Терн. 2006. – 448с.
6. Кнорринг Г. М. Осветительные установки / Г. М. Кнорринг. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. – 288с.
7. Тищенко Г. А. Осветительные установки / Г. А. Тищенко. – М.: Высшая школа, 1984. – 247с.
8. Оболенцев Ю. Б. Электрическое освещение общепромышленных помещений / Ю. Б. Оболенцев, Э. Л. Гнидин, – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 111с.
9. Трембач В. В. Световые приборы / В. В. Трембач. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 459 с.
10. Фаермарк М. А. Местное освещение / М. А. Фаермарк, М. В. Семенова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 85 с., ил. – (Б-ка светотехника; Вып. 15).
11. Лесман Е. А. Освещение административных зданий и помещений / Е. А Лесман. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 89 с., ил. – (Библиотека светотехника; Вып. 13).
12. Тульчин И. К. Электрическое освещение школ и дошкольных сооружений / И. К. Тульчин – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 87 с., ил. – (Библиотека светотехника; Вып. 10).
13. Коц А. Я. Освещение электрических станций и подстанций – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 89 с., ил. – (Библиотека светотехника; Вып. 6).
14. Кладницкий Д. А. Справочник по осветительной аппаратуре / Д. А. Кладницкий, С. И. Чубатый. – К.: Техніка, 1986. – 152 с.
15. Демчев В. И. Прожекторное освещение / В. И Демичев, В. М. Царьков – М.: Энергия, 1972. – 80 с., ил. – (Библиотека электромонтера)
16. Ефимкина В. Ф. Светильники с газоразрядными лампами высокого давления / В. Ф. Ефимкина, Н. Н. Софронов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с., ил. - (Библиотека светотехника; Вып. 8)
17. Шуберт Ф.У. Светодиоды / Ф.У. Шуберт. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
18. Коган Л.М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов / Л.М. Коган // Новости светотехники. – 2001. – №7, 8 (34-35) – С. 47.

19. Коган Л. М. Светодиодные осветительные приборы / Л.М. Коган // Светотехника. – 2002. – №5 – С. 16-20.
20. Сан Мартин. Р. Некоторые важные проблемы светотехники / Р. Сан Мартин // Светотехника. – 2004. – №3. – С. 45-48.
21. Цюпак Ю. А. Оптические системы светодиодных световых приборов: монография / Ю. А. Цюпак. Сар.: Изд-во Мордов. Ун-та. – 2009. – 72 с.
22. Лебедев О. А. Полимерная оптика для светоизлучающих диодов / О. А. Лебедев, В.Е. Сабинин, С.В. Солк // Светотехника. – 2001. – №5 – С.18-19.
23. Пат. На полезную модель 63026. Рос. Федерация. Оптическая система / Ю.А. Цюпак. 4.12.2006.
24. Абрамова Л.В. Возможности и недостатки традиционных прожекторных оптических систем / Л.В. Абрамова, Ю.А. Цюпак, А.В. Балашов // VI Международная научно-техническая конференция. – Саранск, 2008. – С. 3-7.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ.....	5
1.1. Класифікація світлових приладів.....	5
1.1.1. Класифікація СП за основними ознаками	5
1.1.2. Класифікація СП за додатковими ознаками	7
Питання для самоперевірки.....	15
2. СВІЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СП.....	16
2.1. Повна світлотехнічна класифікація світильників	20
2.2. Вторинні світлотехнічні характеристики.....	25
2.2.1. Характеристики яскравості	26
2.2.2. Захисні кути	27
2.2.3. Коефіцієнт корисної дії	30
2.2.4. Світловий потік СП	31
2.2.5. Структура випромінювання	32
Питання для самоперевірки.....	34
3. ОПТИЧНІ СИСТЕМИ СП	36
3.1. Відбивальні оптичні системи	36
3.2. Заламлюючі оптичні системи	46
3.2.1. Лінзові елементи	46
3.2.2. Призмові елементи	48
3.2.3. Лінзові та призмові оптичні системи.....	49
3.2.4. Комбіновані оптичні системи.....	54
3.2.5. Освітлювальні прилади з гнучкими волоконними світловодами.....	58
3.3. Дифузійні відбивачі, екранувальні ґрати, кільця	62
Питання для самоперевірки.....	64
4. МЕТОДИ СВІЛОТЕХНІЧНОГО РОЗРАХУНКУ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ.....	66
4.1. Методи розрахунку СП за площею та яскравістю світлої частини.....	67
4.1.1. Метод оптичних зображень	67
4.1.2. Метод зворотного ходу променів	68
4.1.3. Метод елементарних відображень	68
4.2. Властивості елементарних відображень	69
4.3. Розрахунок світлових приладів із дзеркальними відбивачами.....	87
4.3.1. Пластинчасті відбивачі	91
4.3.2. Парабо-лоциліндричні відбивачі	94
4.3.3. Дзеркальні відбивачі світильників.....	95
4.4. Метод світлових потоків.....	100
4.5. Світильники із дзеркальними циліндровими відбивачами й лінійними джерелами світла	105
4.6. Розрахунок конструкції та світлових параметрів світлодіодного прожектора далекої дії.....	109

4.6.1. Твердотіла повноохоплююча оптична система (ТПС) світлодіодного прожектора.....	109
4.6.2. Розрахунок параболоїдного відбивача ТПС.....	110
4.6.3. Розрахунок профілю центральної лінзи за допомогою твердотілої дзеркально-лінзової оптичної системи прожектора.....	112
4.6.4. Розрахунок ступінчастого профілю центральної лінзи ТПС.....	114
4.6.5. Розрахунок світлових параметрів світлодіодного ТПС. Світла частина оптичної системи світлодіодного прожектора з різними видами ТПС	114
4.6.6. Розрахунок манжєнівської сили світла світлодіодного прожектора	116
Питання для самоперевірки.....	117
Додаток А	118
Додаток Б.....	119
Додаток В	120
Додаток Г	121
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	122

Навчальне видання

ЛИТВИНЕНКО Анатолій Савелійович

ЧЕРКАШИНА Олена Леонідівна

СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ДЛЯ СТУДЕНТІВ ВИЩИХ ТЕХНІЧНИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

Відповідальний за випуск *О. М. Ляшенко*

Редактор *К. В. Дюкар*

Комп'ютерне верстання *Є. Г. Панова*

Дизайн обкладинки *І. П. Шелехов*

Підп. до друку 07.04.2010 р.

Друк на ризографі

Тираж 300 пр.

Формат 60x841/16

Ум. друк. арк. 5,5

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4705 від 28.03.2014